

Datamulor i framtida militära ledningssystem

Ett komplement till traditionell radiokommunikation
genom fysisk transport av data

PÄR-ANDERS ALBINSSON



Pär-Anders Albinsson

Datamulor i framtida militära ledningssystem

Ett komplement till traditionell radiokommunikation genom fysisk transport av data

Titel	Datamulor i framtida militära ledningssystem – Ett komplement till traditionell radiokommunikation genom fysisk transport av data
Title	Data mules in future command and control systems – A complement to traditional radio communication through physical transport of data
Rapportnr/Report no	FOI-R--5592--SE
Månad/Month	Mars
Utgivningsår/Year	2024
Antal sidor/Pages	37
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	FMV
Forskningsområde	Ledningsteknologi
FoT-område	
Projektnr/Project no	E3800905
Godkänd av/Approved by	Emil Hjalmarson
Ansvarig avdelning	Cyberförsvar och ledningsteknik

Bild/Cover: Pär-Anders Albinsson

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Vi tar avstamp i de framtida militära ledningssystemens ökande behov av kommunikation. Genom att använda drönare som ledningssystemnoder som fysiskt transporterar data mellan spridda förbandsdelar kan dessa så kallade *datamulor* möjliggöra dataöverföring även när enheter befinner sig utanför ordinarie radiotäckning. Rapporten innefattar en litteraturgenomgång och en diskussion kring datamulor i relation till militär ledning genom bland annat tre framåtblickande scenarion. Trots att området är under utveckling bedömer vi att datamulor visar tillräcklig potential för fortsatt utforskning. Även om avancerade lösningar med samarbetande och dynamiska datamulor kräver omfattande hård- och mjukvaruutveckling, kan grundläggande funktionalitet uppnås med en enkel tillämpning där alla datamulor agerar mer statiskt. Att inleda försök och experiment med sådana enkla tillämpningar är ett sätt att bättre förstå datamulors potential och begränsningar inom militär ledning för Försvarsmakten.

Nyckelord: datamulor, datamulning, UAV, drönare

Summary

Our starting point in the report is the increasing need for communication of the future military command systems. By using drones as command and control system nodes that physically transport data between dispersed units, these so-called *data mules* can enable data transmission even when units are outside of regular radio coverage. The report includes a literature review and a discussion on data mules in relation to military command and control, incorporating three forward-looking scenarios. Despite the area being under development, we assess that data mules show sufficient potential for continued exploration. Although advanced solutions involving collaborative and dynamic data mules require extensive hardware and software development, basic functionality can be achieved with a simple application where all data mules act more statically. Starting trials and experiments with such simple applications is a way to better understand the potential and limitations of data mules in military command and control for the Swedish Armed Forces.

Keywords: data mule, data muling, UAV, drones

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Bidrag.....	8
1.2	Upplägg.....	8
2	Bakgrund.....	9
2.1	Kommunikation i militär ledning	9
2.2	Datamulning	9
2.3	Militära datamulor	12
3	Datamulning för Försvarsmakten	15
3.1	Styrkor och svagheter	15
3.2	Energiförbrukning.....	16
3.3	Nodtyper och routing.....	17
3.4	Ruttplanering.....	17
3.5	Navigering	19
3.6	Dedikerad och opportunistisk datamulning	19
3.7	Komplettera traditionell radio	20
3.8	Informationssäkerhet	21
3.9	Tekniker för informationsutbyte.....	23
3.10	Scenarion.....	25
4	Diskussion	31
4.1	Realiserbarhet.....	31
4.2	Fortsatt arbete.....	32
5	Slutsats	33
6	Referenser.....	35

1 Inledning

Längre räckvidd och högre datatakt är ständiga önskemål för militär kommunikation. I kombination med att vara rörlig, svår att upptäcka och att avlyssna utgör dessa önskemål en stor utmaning i all ledning. Att låta UAV:er¹ vara mer eller mindre kompletta ledningsstödsystemnoder (LSS-noder) som förflyttar sig mellan delar av förband, är ett möjligt sätt att tackla denna utmaning. Vi diskuterar konceptet att fysiskt transportera data mellan öar av kommunikationstäckning och på vilka olika sätt denna lösning kan realiseras för att svara upp till kommunikationsönskemålen.²

Militär ledning har länge karaktäriserats av ett behov av att öka spridningen av information både till mängd och utbredning. Ända ner till handhållna system i avsuttna plutoner finns förväntningar att kunna se positioner och rapporter i nära realtid från allt mer avlägsna delar av förbandet. Förbanden väntas dessutom verka på och ha situationsförståelse över ett allt glesare slagfält. Att verka i en allt mer vidsträckt utmanande terräng, med högre rörlighet, större beroende av teknik som genererar data, samtidigt som man vill undgå upptäckt, ställer stora krav på framtida kommunikationslösningar. Det behövs komplement till traditionella radiosystem så som taktisk radio på lägre förbandsnivåer och radiolänk på högre förbandsnivåer. Att använda UAV:er som radiobryggor är ett sådant komplement (Grönkvist m.fl., 2024; Lee m.fl., 2020). Men eftersom denna lösning i grunden fortfarande bygger på att skapa ett sammanhängande och yttäckande radionät – UAV:er tillsammans med resten av förbandets radionoder – är lång räckvidd, hög datatakt och låg risk för upptäckt fortfarande en utmaning.

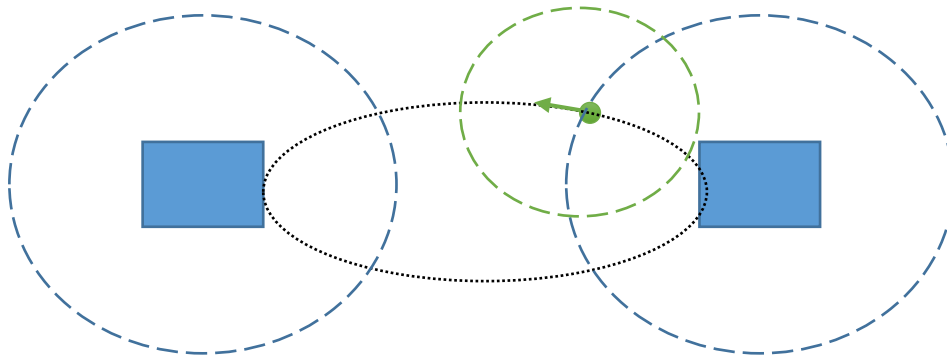
En UAV som utgör en nod i ett ledningsstödsystem (UAV-LSS-nod) skulle utöver radioutrustning dessutom behöva bära en dator med en LSS-server installerad och vara en del av ett eller flera ledningsdatanät som exempelvis ett stridsfordon eller en nod vid en ledningsplats. En UAV-LSS-nod behöver inte förlita sig på en pålitlig radioförbindelse som en UAV som utgör *radiobrygga* måste när den länkar samman två separata delnät för direkt radioförbindelse däremellan. Istället kan den liknas med en ordonnans som fysiskt förflyttar sig för att leverera information mellan två parter och agerar därmed *LSS-brygga*.

Det enklaste scenariot innefattar en ensam UAV-LSS-nod som åker fram och tillbaka mellan två förbandsdelar, som inte har radiokontakt med varandra, och synkroniserar deras LSS-data (Figur 1). När UAV-LSS-noden befinner sig vid ena förbandsdelen får dess ledningsstödsystem samma information som resten av LSS-noderna i denna förbandsdel. UAV-LSS-noden rör sig gradvis utanför förbandsdelens radiotäckning och är till slut helt isolerad kommunikationsmässigt. Efter ett tag rör den sig in i nästa förbandsdels täckningsområde och kan börja synka sina LSS-data med deras noder. Information som den andra förbandsdelen inte tagit del av från första förbandsdelen kopieras in och information som andra förbandsdelen skapat under tiden UAV-LSS-noden varit utanför täckning kopieras in på UAV-LSS-noden. När UAV-LSS-noden passerat förbandsdelen är synkningen klar och processen upprepas när noden flyger tillbaka till första förbandsdelen.

Denna lösning kallas för *datamulning* (eng: data muling) baserat på att UAV-LSS-noden ses som en mula med data i dess packning (Shah m.fl., 2003). Det finns en uppsjö av möjliga scenarion och aspekter inom datamulning att ta hänsyn till, undersöka och testa för att bedöma hur konceptet kan stödja ledning i nära framtid och på längre sikt. Denna rapport redovisar några första steg i en sådan undersökning.

¹ Obemannade luftfarkoster, drönare (eng: unmanned aerial vehicle)

² Rapporten är en av flera leveranser från projektet *Framtida LSS Mark* och dess föregångare och bygger därmed på kollektiva insatser över tid.



Figur 1: En UAV-LSS-nod (grön symbol) följer en rutt (grå prickad oval) mellan två delar av ett förband (blåa rektanglar). Radioräckvidden visas som streckade cirklar. I figuren lämnar UAV:n ena förbandsdelens radiotäckning och fortsätter utan radiotäckning tills den kommer in i nästa förbandsdels täckning och kan påbörja synkningen av LSS-data.

1.1 Bidrag

Vårt huvudsakliga bidrag med denna rapport är att:

- Förklara begreppet datamulning.
- Relatera aspekter av datamulning till militär ledning.
- Visa några framåtblickande scenarion där datamulor används.

Utöver dessa bidrag diskuterar vi även vilka delar av datamulning som är realiserbara i närtid och vilka delar som vi bedömer ligger längre fram i tiden.

1.2 Upplägg

Nästa kapitel ger en bakgrund till kommunikationens avgörande och ökande betydelse för militär ledning samt utvecklingen av konceptet datamulning och relaterat arbete. Därefter ger vi vår syn på möjliga användningsscenarion för att använda datamulning i ledning följt av förslag på lämpliga försök och experiment för att undersöka frågan vidare. Vi avslutar rapporten med en diskussion och slutsatser.

2 Bakgrund

2.1 Kommunikation i militär ledning

En tydlig utveckling inom militär ledning är ett ökat utbyte av information (Försvarmakten, 2022). Nere vid förbandens spets där enskilda eller små grupper av individer ska realisera framtagna planer är det naturligt att så mycket stödande information som möjligt görs tillgänglig. På samma vis är det också naturligt att så mycket värdefull information som möjligt förmedlas från spetsen till högre förbandsnivåer för att där kunna ligga till grund för lägesförståelse, beslut och fortsatta planer. En skillnad från tidigare är att tempot är högre, avstånden längre och komplexiteten större. Även förväntningarna på tillgänglig information är större. Men en ännu större skillnad är hur mycket mer data som *kan* hämtas in. Datoriserade ledningsstöd, sensorer och annan teknik som genererar data ökar i rasande takt – snabbare än tekniken för att förmedla dessa data på slagfältet (och för den delen ta till sig informationen). Taktisk radio har utvecklats till att bli tåligare (t.ex. genom störskydd), nå längre (t.ex. via multihopp) och få högre dataakt (t.ex. genom större bandbredd, effektivare modulation, högre frekvenser) men fysikaliska begränsningar håller emot. En utveckling mot ett glesare slagfält ställer kommunikationssystemens förmåga på sin spets då rörligheten och avstånden förutspås öka ännu mer (Försvarmakten, 2022). Stora datamängder och stora avstånd talar emot taktisk radio, medan rörlighet och fysiskt skydd talar emot fast infrastruktur som exempelvis radiolänk. Behovet av att vara svårupptäckt talar emot all form av traditionell rundstrålande radio med hög effekt, och störskydd är en utmaning för radiokommunikation generellt. Det finns således ett behov av kompletterande sätt att överföra data i Försvarmaktens ledningssystem och datamulning är ett potentiellt sådant sätt.

2.2 Datamulning

Att använda UAV:er som radiobryggor är ett växande forsknings- och teknikutvecklingsområde där varierande transmissionssystem som Wi-Fi³, 5G⁴ och taktisk radio används och där routing och ruttplanering är centrala frågor (Bark m.fl., 2021; Grönkvist m.fl., 2024; Li m.fl., 2018; Cao m.fl., 2018; Mozaffari m.fl., 2019; Hayat m.fl., 2016). Till skillnad från att bara vidarebefordra radiosignaler så innebär datamulning i sin enklaste form att en bärare (datamulan) *fysiskt transporterar* data från en nod till en annan. UAV:er är en av flera möjliga realiseringar av bärardelen hos en datamula. Även till exempel lastbilar, fartyg, motorcyklar, människor eller djur kan agera datamulor. Vi väljer dock att fokusera på UAV:er eftersom de har tydliga fördelar med hög hastighet, gynnsam radiotäckning och en rusande teknisk utveckling.

Vi börjar med att sätta in begreppet datamulning i ett större sammanhang. Det har vuxit fram ett flertal överlappande begrepp i området som vi tar upp och relaterar till varandra. Därefter tar vi upp ett antal viktiga aspekter inom datamulning.

2.2.1 Fördröjningstoleranta nätverk

Datamulning ingår som *ett* lösningsalternativ i det bredare begreppet *fördröjningstoleranta nätverk* (eng: delay tolerant networks, DTN). DTN är ett begrepp som använts sen 2000-talet och tekniska lösningar har tagits fram för en rad områden som exempelvis nätverk på fattig landsbygd, övervakning av vilda djur, låghöjdssatelliter, optiska länkar i yttre rymden, akustiska länkar i vatten och militära ad-hoc-nät (Fall, 2003). Bakgrunden till DTN är dock betydligt äldre och har sina rötter i rymdkapplöpningen mellan USA och

³ Vi använder Wi-Fi i rapporten i den vardagliga betydelsen trådlöst LAN (WLAN).

⁴ 5:e generationens mobilnät

Sovjetunionen med början på 1950-talet⁵. DTN handlar förenklat om nätverk där förbindelser är sporadiska och ofta försvinner helt under perioder. Routing måste hanteras på andra sätt än normalt eftersom det är svårt att hitta en väg från sändare till mottagare direkt. Man måste använda en ”spara och skicka vidare”-metod där data flyttas stegvis vidare i nätet med hopp om att till slut nå fram (Fall, 2003).

Datamulor har använts som begrepp åtminstone sen början av 2000-talet (Shah m.fl., 2003) och de första användningsområdena var framförallt övervakning av vilda djur (Juang m.fl., 2002) och nätverk i utvecklingsländer (Pentland m.fl., 2004). Mycket av forskningen kring datamulor handlar om att räkna ut optimala rutter (Singh & Kumap, 2020), synkning av data (Jea m.fl., 2005) och att hitta strömsnåla lösningar (Trotta m.fl., 2020). I fallet med övervakning av vilda djur, utrustades djuren med ett strömsnålt system med sensor, lagring och kommunikation och agerade därmed själva datamulor. När djuren kom nära varandra synkades insamlade sensordata och när en uppsamlande nod kom inom räckvidd kunde alla data samlas in. I fallet med nätverk i utvecklingsländer agerade lokala bussar datamulor där invånares data transporterades mellan byar för att på så vis nå fram till destinationen.

2.2.2 Trådlösa ad-hoc-nät och marksensornät

Trådlösa ad-hoc-nät är ett lämpligt nästa steg för att förtydliga begreppet datamulning (Bekmezci m.fl., 2019). I sin enklaste skepnad är ett ad-hoc-nät ett decentraliserat nätverk av likvärdiga stationära noder utan någon fast infrastruktur där noderna själva skickar vidare data baserat på deras förståelse för nodernas aktuella förbindelser. Ett steg närmare ursprunget för datamulning är området marksensornät, ofta realiserat som ad-hoc-nät, där ett antal olika typer av noder samarbetar (Di Francesco m.fl., 2011):

- Sensornoder genererar data (t.ex. temperaturdata från en termometer)
- Sänkor samlar på sig data (t.ex. en fast basstation)
- Supportnoder kan agera bryggor eller mellanlagring (t.ex. en fast bryggstation)

För att utöka användningsområdena för marksensornät introducerades möjligheten att en eller flera av noderna gjordes mobila (Di Francesco m.fl., 2011):

- Flyttbar nod: En nod som kan förflyttas för att ändra topologin i nätet men som inte är aktiv i nätet under själva förflyttningen.
- Mobil datainsamlare: Antingen mobila sänkor som besöker sensornoder och hämtar data, eller mobila bryggor som hämtar data från sensornoder och lämnar dem till sänkor.
- Mobil peer: En mobil utökad sensornod som förutom att generera data också kan mellanlagra data från andra sensornoder för att sedan föra över data till sänkor.

Sha och kollegor (2003) kallade en mobil sänka för en *datamula* och beskrev en arkitektur i tre lager där datamulor transporterade data från stationära sensornoder till stationära accesspunkter⁶. De beskrev vidare fördelarna och nackdelarna med datamulor (Sha m.fl., 2003): Med hjälp av en eller flera mobila noder minskar behovet av infrastruktur med exempelvis fasta basstationer och gör lösningen robustare och mer skalbar. Dessutom kan routing-overheaden minskas, transportmedium kan användas för olika syften och dataöverföring kan koncentreras till korta avstånd med hög kapacitet och låg effekt. Tydliga nackdelar inkluderar den högre fördröjningen och kravet att mulan behöver kunna förflytta sig i miljön vilken kan vara föränderlig och fientlig.

⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_delay-tolerant_networking

⁶ Begreppen används dock olika och under senare tid är det vanligt att även mobila peers kallas för datamulor. Begreppet mobila ad-hoc-nätverk (MANET) används ofta i samma syfte och de mer specifika begreppen fordonsbaserade ad-hoc-nätverk (VANET) och flygande ad-hoc-nätverk (FANET) överlappar både datamulning och sensornätverk. Ett annat förekommande synonymt begrepp är meddelandefärjor (message ferries).

2.2.3 Ruttplanering

Ett annat problem som introduceras med mobila noder är ruttplanering. I det enklaste fallet handlar planeringen om val av rutt för en enskild datamula som ska besöka flera sensornoder på ett så effektivt sätt som möjligt. Ofta är det dock flera datamulor som samarbetar och då tillkommer även lastbalansering för att mulorna ska hantera lagom många noder och data vardera (Jea m.fl., 2005; Singh & Kumar, 2020). Ruttplanering kan enligt Di Francesco och kollegor (2011) delas in i följande typer:

- Statisk styrning: fördefinierade rutter såsom cirklar, linjer eller polygontåg där ett mål kan vara att alla statiska sensornoder ska nå dig med ett radiohopp.
- Prioritetsstyrning: sensornoderna kan hanteras olika beroende på exempelvis hur mycket data de bedöms generera och därmed besökas olika ofta eller länge.
- Dynamisk styrning: datamulor kan ändra sin rutt under pågående förflyttning baserat på inkommen information.

Ruttplanering kan även handla om att maximera förbindelser mellan isolerade subnät snarare än att bara maximera antalet noder som nås vilket är högst relevant i en militär kontext (Lee m.fl., 2020).

Fartkontrollen för en datamula kan också variera mellan den enklaste varianten där den helt enkelt är stillastående inom radoräckvidd med en nod tills alla data är överförda och sedan fortsätter, och den mer dynamiska varianten där hastigheten justeras kontinuerligt när kontakt etableras med en sensornod eller sänka för att bli klar med överföringen lagom när den lämnar området igen (Di Francesco m.fl., 2011). I de fall tidsplaneringen eller exponeringen är överordnad dataöverföring får helt enkelt de data som hinner överföras under förbindelsetiden följa med mulan vidare, med risk för att inte få med all data. Ett flertal studier har undersökt hur mycket data som kan överföras när en nod passerar i hög hastighet (Tufail m.fl., 2008; Lu m.fl., 2014). Används Wi-Fi med modifierade handskakningsalgoritmer kan flera megabytes överföras när en nod passerar av ett fordon i upp till 180 km/h (Eriksson m.fl., 2008; Ott & Kutscher, 2004).

2.2.4 Routing

Med mobila ad-hoc-nät som har som mål att hålla ett *sammanhängande* yttäckande samband är routingen av data en utmaning (Hinds m.fl., 2013): När mobila noder flyttar sig och deras förbundenhet ändras ökar risken att mycket data flödar mellan noder utan nytta. Overheadtrafiken för att upprätthålla routinginformation ökar samtidigt som det är svårt för noderna att effektivt dela den begränsade gemensamma radiokapaciteten eftersom noderna inte har en komplett bild av varandras databehov. Med datamulor blir routingen och ruttplanering sammanflätade och på ett vis ofta enklare eftersom dataöverföringen normalt bara sker lokalt när noder möts och där överföringskapaciteten inte är lika begränsad. När två datamulor kommer inom räckvidd till varandra kan de ofta dessutom på applikationsnivå komma fram till vilka data som behöver synkas och därmed undvika att överföra data i onödan. I de fall mulorna används i scenarion där mer data genereras än vad mulorna kan hantera, eller där noderna är glest utspridda och sällan besökta, blir det dock viktigare att kunna resonera om vilka data som ska prioriteras att kopieras i varje situation (Singh & Kumar, 2020).

2.2.5 Transmissionssystem

Det vanligaste användningsområdet för mulor är att använda transmission med låg effektförbrukning över korta avstånd. Det finns dock inget som hindrar att mulorna bär flera olika transmissionssystem. Mertens och kollegor (2020) presenterade en variant av sensornätverk med datamulor där stationära sensornoder hade långräckviddig (men väldigt smalbandig) kontakt med mobila sänkor (datamulor) där lättviktig statusinformation spreds om var och hur mycket data det fanns att hämta. Noderna hade också en korträckviddig radio med hög bandbredd som användes när en datamula bestämmer sig för

att förflytta sig inom räckvidd för den radiotäckningen. Flera transmissionssystem per mula är också ett sätt att öka transmissionsredundansen. En mula skulle exempelvis kunna ha både Wi-Fi, 5G och LoRa⁷ för att på så sätt anpassa sig till situationen.

2.2.6 Energiförbrukning

Traditionell datamulning lägger stor vikt på strömsnålhet (Singh & Kumar, 2020). Ofta rör det sig om sensornoder som ska kunna operera under lång tid utan extern strömförsörjning. Trotta och kollegor (2020) presenterade en variant av ultraströmsnåla sensornoder som väcks bara vid inkommande radiosignal från datamulan och dessutom tillgodogör sig ström från mulan vid synkning. Framförallt i den tidiga forskningen om datamulning var även minneskapacitet och beräkningskapacitet en viktig aspekt att förhålla sig till (Sha m.fl., 2003). En datamulas begränsade lagringskapacitet måste exempelvis tas i beaktande i ruttplanering och routing. Med en mångfaldigt högre lagringstäthet och strömsnålare elektronik har dessa begränsningar blivit mindre problematiska på senare tid.

2.2.7 Dedikerad och opportunistisk datamula

Datamulor kan vara dedikerade eller opportunistiska. En i förväg planerad datamula som har som huvuduppgift att bära data mellan noder enligt rutter som optimeras för just det syftet kallas för en dedikerad datamula. Ett exempel är datamulor som förflyttar sig mellan en eller flera sensorer i oländig terräng och en uppsamlingsplats där sensordata kan analyseras (Sha m.fl., 2003; Di Francesco m.fl., 2011). En opportunistisk datamula å andra sidan monteras på bärare som egentligen har andra huvudsyften. Ett exempel är att använda landsbygdsbussar i fattiga länder som datamulor (Fall, 2003; Pentland m.fl., 2004): Dessa bussar kan vara det enda som någorlunda regelbundet och pålitligt binder ihop byar. En person med en dator med Wi-Fi och en viss installerad programvara synkar automatiskt data till en nod vid en busstation. Bussen som kommer till stationen synkar data i sin nod mot stationens nod och åker vidare vilket åstadkommer en fysisk vidareförmedling av data på köpet.

2.3 Militära datamulor

Militär användning av UAV:er generellt är ett hett forskningsfält, med områden som underrättelseverksamhet (Orfanus m.fl., 2014), mobila ad-hoc-nät (Lee m.fl., 2020; Gargalakos, 2021) och taktiska drönare (Chávez & Swed, 2023). Litteraturen om datamulning i en militär kontext handlar framförallt om sensornätverk (Mountcastle m.fl., 2021; Pan m.fl., 2022). Datamulning som en del av militär stridsledning specifikt, som vi tar upp i denna rapport, är det svårare att hitta studier på. Både Orfanus m.fl. (2014) och Gargalakos (2021) menar att för militär användning är datamulningens intermittenta förbindelser och fördröjningar ett hinder och föreslår istället lösningar som har oavbruten kommunikation som mål. Full täckning över tid är bättre än intermittenta förbindelser om resurserna finns för att nå dit på ett i övrigt säkert och effektivt sätt. Denna målsättning kan vara en av orsakerna till bristen på studier på datamulning för stridsledning. I en av de få studier som vi hittade var Zhao & Ammar (2003) tidigt ute. De kallar datamulorna för meddelandefärjor (*message ferries*) och argumenterar för att det torde finnas typer av data inom militär ledning som passar bra att överföra via datamulor, som exempelvis textdokument och olika typer av filer. Nu, drygt 20 år senare, har datamängderna inom militär ledning ökat betydligt och inkluderar oftare stora filer som exempelvis högupplöst bild- och videounderlag – en lämplig last för datamulor. Zhao & Ammar (2003) beskriver olika uppsättningar av datamulor och en routing-modell som de utvärderar med simuleringar. Två uppföljande studier bygger vidare på denna routing-modell: Viswanathan & Chuah (2005) lägger till möjligheten att routingen tar hänsyn till prioritet

⁷ Eng: Long range. En vanlig teknik för radiokommunikation för lång räckvidd men låg dataakt.
<https://en.wikipedia.org/wiki/LoRa>

på de data som hanteras av mulorna och Chuah & Yang (2005) utvecklar det ett steg till genom att tillåta data att ha deadline-tidpunkter när de måste vara framme hos mottagaren. Inga av dessa studier presenterar dock några konkreta scenarion för hur mulorna skulle kunna användas i ett ledningssammanhang. Några rapporter om huruvida dessa idéer har implementerats har heller inte hittats. I en relativt nylig redovisning av en implementation av datamulor i fält rapporterar Mountcastle och kollegor (2021) att de inte hittat några andra publikationer med en sådan praktisk inriktning.

3 Datamulning för Försvarsmakten

I förra kapitlet gick vi igenom de viktigaste aspekterna av datamulning. Vi kommer nu förhålla oss till dessa aspekter i relation till Försvarsmaktens potentiella användning: Vad är speciellt relevant för Försvarsmakten och vad är mindre relevant?

Vi börjar med att kort ta upp datamulors övergripande styrkor och svagheter för användning i Försvarsmakten för att sedan gå in på de specifika områdena i mer detalj. Kapitlet avslutas med tre konkreta framåtblickande scenarion där datamulor används för dataöverföring i ledning.

3.1 Styrkor och svagheter

Datamulning bedöms ha ett flertal attraktiva styrkor för användning inom militär ledning. Nedan följer några exempel på dessa styrkor:

- Enkelt att testa: UAV:er har sjunkit i pris samtidigt som de blir allt mer effektiva. I ett militärt sammanhang är tekniken billig, speciellt om vi rör oss inom enklare kommersiella modeller. Med befintliga lösningar för UAV:er, Wi-Fi, lättviktsdatorer och lättvikts-LSS torde test och försök kunna gå snabbt.
- Korta ställtider: Datamulor har ett litet behov av fast infrastruktur. När väl all materiel är tillgänglig, rutter uppsatta och kunskapen att hantera tekniken är säkerställd bedöms ställtiden för att driftsätta datamulorna vara relativt kort.
- Skalbart: Genom att addera fler mulor till en rutt, eller lägga till fler rutter är det konceptuellt enkelt att öka effektiviteten både gällande datatakt och fördröjning.
- Flexibelt: Rutter kan ändras mitt under pågående flygning, LSS-noder kan omprioriteras och datamulor kan stanna längre i luften för att hämta hem temporärt större datamängder.
- Snabb lokal dataöverföring: Genom att komma nära LSS-noderna kan mycket snabb dataöverföring uppnås och mängden data som kan hanteras kan skapa nya möjligheter inom ledning.
- Ökad radiotystnad: I de fall där endast mulor används för dataöverföring behövs ingen långsträckt radio och därmed åtnjuts de fördelar som kommer med radiotystnad.
- Komplettera befintlig transmission: Datamulning fungerar bra som ett komplement till annan typ av transmission. Vissa typer av data kan exempelvis kommuniceras via traditionell radio medan andra typer kommuniceras via mulor. Eller så kan mulor och traditionell radio hantera samma data och låta LSS-mjukvaran sköta synkningen.
- Opportunistisk mulning: Inom militär ledning finns stora möjligheter att meranvända system med andra primärsyften för datamulning. UAV:er för spaning, övervakning eller mer offensiva syften kan förses med hårdvara för att dessutom agera mulor. Att agera mula behöver inte begränsas till flygande plattformar. En vanlig LSS-nod, till exempel ett stridsfordon, som under förflyttning tappar förbindelsen med en del av förbandet och senare upprättar en förbindelse med en annan del av förbandet har i princip agerat datamula.
- Flera transmissionssystem per mula: Att kombinera ett transmissionssystem liknande Wi-Fi med ett smalbandigt och långsträckt komplement kan vara speciellt tillämpligt inom militär ledning där omständigheter tenderar att förändras snabbt och dynamisk styrning av mulornas rutter blir viktigt. Mulorna kan då även agera radiobryggor för mindre datamängder.

Datamulning har även flera svagheter när det kommer till militär ledning. Nedan följer en kort beskrivning av svagheter och hur de kan hanteras.

- Nytt koncept: Det finns lite öppet material att hitta om datamulning för militär ledning. Eventuella fallgropar och oförutsedda problem utgör en påtaglig risk.
- Hög fördröjning: Datamulningens största generella nackdel är den höga fördröjningen. I bakgrundskapitlet tydliggörs hur traditionella användningar av datamulning oftast handlar om scenarion där fördröjningar inte är ett stort problem. Militär ledning är ett brett område och även om många scenarion kräver låga fördröjningar finns det fall då fördröjningar är acceptabla. Samtidigt är utvecklingen av UAV:er snabb och även relativt billiga UAV:er kommer nu upp i allt högre hastigheter.
- Upptäckt och röjning: När det gäller att minska risken för upptäckt av en flygande UAV finns inte ett starkt utvecklingsbehov utanför en militär (och polisiär) användning. Den forskningen och utvecklingen ligger därmed till stor del inom försvarssektorn vilket innebär mindre möjligheter att dra nytta av civil utveckling. Ett sätt att hantera svagheten är genom anpassade ruttor som minskar risken för upptäckt och röjning av förbandens placeringar.
- Fientlig miljö: Datamulornas generella svaghet att påverkas av tuffa miljöer som exempelvis vind, regn och olika former av störningar och hinder ställs på sin spets i militära sammanhang där även avancerade fientliga motmedel är att vänta.
- Informationssäkerhet: Datamulor kommer att hamna i fiendens händer förr eller senare och därmed även deras last. På samma sätt som upptäckt och röjning är även detta område lågt prioriterat inom den civila användningen av datamulor. För militära scenarion är det dock högt upp på dagordningen. Adekvat kryptering är en grundläggande början för att minska risken för att information kommer i orätta händer. Det finns även sätt att minimera dataunderlaget som mulan bär med sig och sätt att begränsa LSS-programvaran så att vissa funktioner blir svårare att komma åt.
- Störd GNSS: Att en motståndare skulle störa mulornas GNSS-navigering är också ett typiskt militärt scenario. I takt med den ökade militära användningen av UAV:er, läggs mycket kraft på att hantera denna svaghet. En sätt runt problemet är att minimera behovet av GNSS för navigering genom exempelvis tröghetsnavigering, radiofyrar och geolokalisering via kamera.

Styrkorna och svagheter ovan återkommer i kommande avsnitt i mer detalj.

3.2 Energiförbrukning

Inom datamulning läggs ofta stor vikt på energiförbrukning. Det kommer framförallt ifrån sensordelen av ett datamulningsscenario där sensornoder under lång tid ska kunna samla in och dela med sig av data. När det gäller potentiell användning av datamulor för Försvarsmaktens ledningssystem bedömer vi att energisnålhet i många fall är ett mindre problem. De noder som framförallt motsvarar det som benämns som sensornoder i Försvarsmaktens fall är vanliga LSS-noder som stridsfordon, ledningsplatser och i viss mån enskilda soldater med burna system. För dessa LSS-noder är energiförbrukning inte lika avgörande som för traditionella sensornoder.

Energisnålhet inom datamulning handlar även om själva datamulans energibehov. I ett ledningssammanhang är det också önskvärt att datamulorna är energieffektiva för att ha tillräckligt lång räckvidd och för att inte behöva byta batteri för ofta. I en militär tillämpning, med dedikerad personal och tillgänglig materiel och reservdelar, kan användningen av mulor systematiseras för att på så vis hantera energiförbrukningen effektivt. Ett tydligt exempel när energiförbrukningen blir viktig är om en datamula flygs till en viss position och landar för att på så vis agera stationär nod under längre tid vilket vi tar upp i scenario 1 senare.

3.3 Nodtyper och routing

De olika typerna av noder som togs upp i bakgrundskapitlet – sensornoder, sänkor, bryggor – blir inte lika relevanta att särskilja i vårt fall eftersom LSS-noder i *normalfallet* är likvärdiga. Våra huvudsakliga LSS-noder i form av exempelvis fordon och soldater med burna system är samtidigt både skapare av data (sensornoder), mottagare av data (sänkor) och spridare av data (bryggor). En klassisk datamula enligt tidigare definition är en mobil nod som tar med data från en sensornod till en sänka. I vårt fall blir datamulorna i form av UAV:er istället nästan likvärdiga övriga LSS-noder, med skillnaden att de i normalfallet inte är skapare av data (även om inget hindrar att sensorer på mulan trycker in data i LSS-nätet).

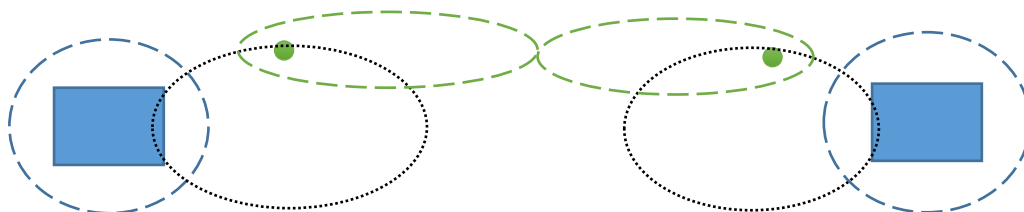
Routing blir även det mindre komplext i vårt fall eftersom alla LSS-noder i *normalfallet* ska ha samma informationsläge. Så snart en datamula får kontakt med en LSS-nod kommer ledningsstödet att räkna ut vad som behöver synkas och ser till att synkningen utförs. Rapporter, positioner, order och kartlager är exempel på allmänt relevanta data som i normalläget alltid kan synkas när en datamula når LSS-noder eftersom förbindelsens dataakt ofta är hög (t.ex. Wi-Fi). Gäller det mycket stora datamängder kan prioriteringsordning eller andra lösningar ta vid, vilket tas upp i avsnitt 3.9. Att datamulorna för över alla data till en LSS-nod betyder inte att den noden i sin tur ska synka dessa nya data över befintliga radionät den är med i. Där är det upp till LSS-noden att bestämma spridningen i radionäten utifrån regler i ledningssystemet. Exempelvis kan en regel diktera att positioner från en grannbataljon ska skickas vidare uppåt i bredbandiga radionät men inte nedåt i smalbandiga radionät.

När en datamula har direktkontakt med flera LSS-noder i radionätet kan den agera som en vanlig radiobrygga (Bark m.fl., 2021). Är mulan utrustad med Wi-Fi kan den fungera som en brygga genom befintlig meshteknik. Om mulan är utrustad med samma taktiska flerhopsradio som övriga LSS-noder kan den använda den för att sammanbinda radionätet. I detta läge används den inbyggda routing som finns i radiosystemen. Så snart datamulan tappar radioförbindelsen mellan LSS-noderna går den från att vara en radiobrygga till att bli en LSS-brygga.

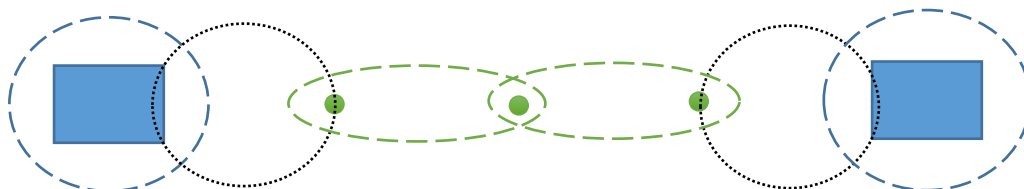
3.4 Ruttplanering

Samtliga typer av rutter som togs upp i bakgrundskapitlet är relevanta i vårt fall. Dock leder existensen av en fiendlig motståndare till en extra dimension. En datamula som upptäcks av fienden kan röja förbandets geografiska läge vilket innebär att rutterna måste anpassas i situationer där upptäckt är sannolik.

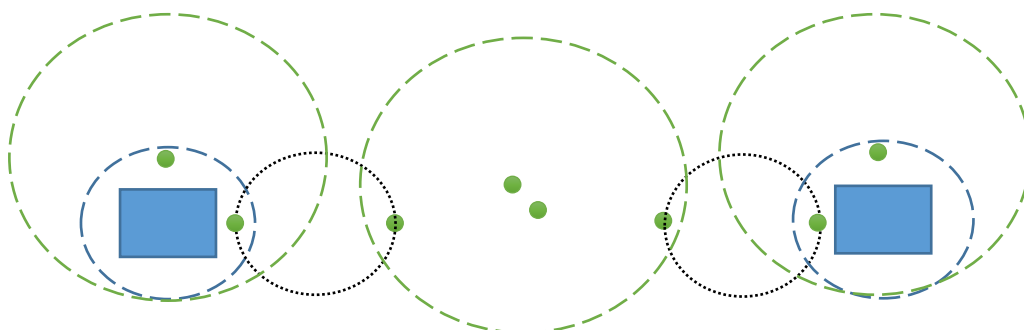
Rutter med statisk styrning är snabba att sätta upp. Förutsägbara mulor förenklar dessutom planeringen för synkningar med LSS-noder och andra mulor. Ett sätt att minska risken att röja förbandspositioner med statiska rutter är att dela upp dem i flera mindre rutter (Figur 2). Eftersom ruten är helt förutsägbar blir det även enklare att använda riktantenner på datamulorna för att öka räckvidden och minska rundstrålningen. För att minska behovet med att mötas halvvägs kan en tredje stationär datamula introduceras (Figur 3). Den stationära mulan kan exempelvis landa i ett träd eller på en luftburen ledning (Chi m.fl., 2014; Paneque m.fl., 2022; Zheng & Hamaza, 2024) och därefter enbart aktiveras när en annan mula kommer inom räckvidd. För ökad redundans kan multipla mulor landa på lämpliga ställen och agera mellanhänder. Stationära mulor kan också användas i närheten av respektive förbandsdel för att på hög höjd nå längre räckvidder och därmed antingen kräva kortare rutter för mulorna i nästa steg, alternativt möjliggöra längre total räckvidd för hela mulningen (Figur 4).



Figur 2: Datamulning med två statiska rutter (gråa prickade ovaler) där mulorna möter varandra på mitten. Kommunikationsräckvidd representeras som streckade ovaler.



Figur 3: Datamulning med en statisk datamula i mitten av två rutter (gråa prickade ovaler). Kommunikationsräckvidd representeras som streckade ovaler.



Figur 4: Datamulning med två statiska datamulor i mitten av två rutter (gråa prickade ovaler) med två datamulor var. Varje förbandsdel har också en stationär datamula på hög höjd inom räckvidd. Kommunikationsräckvidd representeras som streckade ovaler.

Rutter som baseras på prioritetsstyrning passar bra i fall där vi på förhand känner till mönstret för datagenerering. Redan från början kan fler mulor planeras in för en viss rutt där mycket data förväntas och färre mulor för en viss rutt där mindre data förväntas. I militära sammanhang ger hierarkisk struktur, reglementerad ledning och tydliga typer av förband stora möjligheter att utnyttja denna typ av rutter. Förutsägbarheten i denna typ av rutter är dock fortfarande en risk. Ett sätt att minska förutsägbarheten är att matematiskt räkna ut mer oförutsägbara rutter och låta mulorna följa dessa istället (Brynielsson m.fl., 2022). Även om rutten då till synes verkar dynamisk kan den dock vara känd för samtliga LSS-noder inklusive övriga mulor och därmed hanteras som en statisk rutt. Statiska rutter har den grundläggande begränsningen att de inte snabbt kan anpassa sig till förändringar i läget, framförallt egna förbandets förflyttningar.

Rutter med äkta dynamisk styrning lämpar sig förmodligen oftast bäst i militär ledning. Det finns dock en stor spännvidd på den dynamiska styrningen. En enkel form av dynamisk styrning är att datamulorna enbart vid synkningstillfällen med LSS-noder tar del av information som bestämmer deras vidare beteende. Mest grundläggande är att en mula som inte hinner få med sig alla data vid en synkning, berättar detta problem för LSS-noden som i sin tur potentiellt kan aktivera ytterligare en datamula eller omdirigera en datamula från en mindre prioriterad uppgift. Ett annat exempel är att LSS-noden kan informera datamulan om en planerad förflyttning och att datamulan måste uppdatera sin rutt därefter. Ett tredje exempel är att LSS-noden informerar om geografiska områden som datamulan inte får passera, områden den måste hålla sig inom eller positionen för en tillkommen LSS-nod som också ska ingå i rutten. Denna information skulle kunna representeras i ett specifikt kartlager i det ledningsstödsystem som används av förbandet.

Fördröjningen som introduceras med att datamulorna får styrningen först vid synktillfällen kan leda till att dynamiken inte blir tillräckligt responsiv. Därför är datamulor med

multipla transmissionssystem speciellt lämpade för flera av de mer dynamiska uppgifterna i militär ledning. Genom att utrusta datamulan med både ett smalbandigt och ett långsträckviddigt transmissionssystem utöver transmissionssystemet för själva datasynkningen uppstår flera intressanta möjligheter för militär ledning. Den mest grundläggande informationen att sprida på detta extra nät är LSS-nodernas och datamulornas positioner. Datamulornas rutter kan då uppdateras helt dynamiskt för att följa förbandens förflyttningar. Datamulorna kan också informeras om förbindelseläget mellan alla LSS-noder, om det har bildats öar eller om det finns noder som inte har hörts av på ett tag. Utifrån denna information kan datamulor försöka maximera förbindelser mellan isolerade delnät (Lee m.fl., 2020). En mer avancerad användning av detta extra nät är att sprida de olika LSS-nodernas datastatus: Vad saknas på vilka LSS-noder och vilka LSS-noder har data som andra inte har? Denna information kan ligga till grund för den dynamiska styrningen av rutter. Denna möjlighet tas upp i mer detalj i avsnitt 3.8. En mer framåtblickande förmåga är att datamulornas beslut baseras på analyser av faktiska LSS-data som skapats av operatörerna; att systemet tolkar nuvarande läge, gissar om framtiden och anpassar datamulorna därefter.

3.5 Navigering

I litteraturen om datamulor används oftast GNSS⁸ som en viktig komponent i navigering. I vårt fall är det en risk med att förlita sig på GNSS på grund av motståndarens möjligheter att störa dessa signaler och vi har därmed ett större behov av att undersöka alternativ.

Att navigera UAV:er utan GNSS är ett aktivt forskningsfält. Gyagenda och medförfattare (2022) går igenom ett flertal alternativ, inklusive bildigenkänning, laser, radar och lidar medan Griffin m.fl. (2012) undersöker algoritmer specifikt för att positionera UAV:er optimalt i bryggnings syfte genom att kontinuerligt mäta på kommunikationskvalitet. Kombinationer av olika metoder kan ge en särskilt robust lösning. Ett exempel är att börja med en manuellt styrd flygning och då samla in ett högupplöst fotounderlag som senare kan användas vid navigering genom bildigenkänning. Bildigenkänningen är inte begränsad till marken – det finns flera tekniker för att rikta kameran uppåt istället och navigera UAV:er utifrån himlakroppar (Teague & Chahl, 2023). När det gäller att navigera för att följa LSS-noder på marken finns pågående forskning vid FOI (Bark m.fl., 2021).

En potentiellt lämpad metod för militär ledning är att använda radiosignaler från andra noder för att räkna ut sin egen position (Aspnes m.fl., 2006). Ett antal LSS-noder skulle då kunna agera fyror (eng: beacons) och sända ut sina positioner via långsträckviddig radio, vilket övriga noder använder för att bestämma sina egna positioner. I vårt fall är det inte säkert att det alltid behövs särskilt exakt positionering när datamulan är långt från LSS-noderna. Många UAV:er har redan system för att undvika lokala hinder vilket i vårt fall innebär att om datamulorna åtminstone navigerar så pass korrekt att de får kontakt med tänkt LSS-nod för att genomföra synkningen så är det i många fall tillräckligt nära. När datamulan väl börjat få kontakt med en LSS-nod kan algoritmer baserat på signalkvalitet dessutom användas för att navigera närmare (Griffin m.fl., 2012). Behovet av noggrannhet kommer därmed bero på räckvidden för det transmissionssystem som används vid synkning. I fallet Wi-Fi och relativt fri sikt kan det röra sig om hundratals meter.

3.6 Dedikerad och opportunistisk datamulning

Det finns möjligheter för både dedikerad och opportunistisk datamulning i framtidens ledningssystem. För syften där minimering av fördröjning och maximering av datatakt är avgörande torde dedikerad datamulning vara ett måste, dock gärna kompletterad med opportunistisk dito. I de fall datamulningen bara ses som ett positivt komplement som underlättar snarare än avgör, är opportunistisk datamulning möjligtvis bäst pang för

⁸ Satellitnavigation (eng: Global Navigation Satellite System)

pengarna. I takt med att UAV:er används för allt fler syften i Försvarsmakten uppstår fler möjligheter för opportunistisk datamulning. Men UAV:er är inte den enda möjliga datamulan även om denna rapport fokuserar på dem. Fordon som vanligtvis inte är LSS-noder kan visa sig bli nyttiga opportunistiska datamulor. Eftersom tekniken är billig, framförallt när själva UAV:n räknas bort, kan ett stort antal fordon utrustas som datamulor, med lättviktig dator, lagringsmedia och Wi-Fi som ett grundutförande. Lastbilar, terrängfordon, motorcyklar, personbilar och till och med soldater kan bidra till datamulningen. Även traditionell ordonnans kan strömlinjeformas genom att använda samma system. Exempelvis skulle en MC-ordonnans kunna agera som dedikerad datamula. Obemannade mark- och sjöfarkoster skulle också kunna agera datamulor. Mer exotiska exempel inkluderar datamulor burna av ballongsystem, datamulor med flyg- eller fallskärm och ballistiska datamulor.

3.7 Komplettera traditionell radio

Konceptet med datamulning för ledning kan ses som en av flera möjligheter för samband. I de fall stationär infrastruktur med hög och pålitlig kapacitet kan användas utan bedömda risker är det ofta att föredra över ett flygande ad-hoc-nät med UAV:er. Och i de fall UAV:er kan användas för att skapa ett yttäckande kontinuerligt samband är det ofta att föredra framför datamulor. Om flera olika sambandslösningar kombineras kan redundans och alternativ bli värdefullt i situationer där valmöjligheterna plötsligt reduceras.

En generell plattform som både kan användas som radiorelän, mula och sensornod skulle kunna anpassa sin funktion efter en dynamisk kontext. En sensornod som samlar in data och som får information att det skapas mer data i sensornätverket än vad som hinner hämtas kan byta roll och hjälpa till som datamula under en period. På liknande sätt kan en redundant relänod som får information om att mycket data har skapats en bit bort, temporärt byta roll och flyga en rutt som mula för att sedan återgå till rollen som relänod. Ett annat scenario är att ett förband har fler tillgängliga mulor än vad som är i aktiv användning för tillfället och som automatiskt kan ta beslut att hjälpa till med datamulningen när behov uppstår. När det inte finns redundans för att lösa alla uppgifter måste prioritering ske. Antag att befintliga relänoder är viktiga i sin aktiva roll samtidigt som befintliga datamulor inte klarar av nuvarande datatakt och att alla sensornoder i sin tur behöver fortsätta logga data. Om inga extra noder finns att tillgå, uppstår behovet av att värdera de olika rollerna. Är det viktigare att få insamlade sensordata till slutdestination eller är det viktigare att fortsätta ha full sensortäckning? I dessa fall kan både förplanerade regler användas för automatisk fördelning av roller, och ett manuellt ingripande från operatör som bestämmer prioriteten för det aktuella fallet.

I militära ledningssystem finns det ofta mer data att sprida än vad transmissionssystemen tillåter. Data prioriteras och spridningen försöker anpassas till att data når de som verkligen behöver dem. Därmed är det värdefullt om vissa typer av data kan kommuniceras via andra vägar än via den dyrbara bandbredden i radionäten. Om all trafik som inte behöver låga fördröjningar istället för att skickas på radionätet routas om till en datamulningkanal kan bandbredd frigöras för andra typer av data. Det kan röra sig om stora mängder bildmaterial som inte är praktiskt möjligt att skicka över radio, men det kan också röra sig om positioner, rapporter och andra data från förband geografiskt eller uppgiftsmässigt långt bort som inte är direkt avgörande för mottagaren men som ändå ger ett värde om de tas emot senare.

För att få ett sådant system att kunna bedöma data och fungera fullt ut krävs en taggning av data utifrån åtminstone storlek, prioritet, maximalt acceptabel fördröjning, huvudmottagare och skyddsklass och möjligheter att ställa in routingen utifrån dessa taggningar i ledningsstödsystemet. I brist på denna funktionalitet, kan ansvaret för synkning läggas helt på det befintliga ledningsstödsystemet som försöker skicka alla data via både radio och datamulor: I ett radionät där alla data ännu inte hunnit spridas via radio och där en datamula levererar en stor mängd data i nätets utkant kommer

ledningsstödsystemets administrativa synkningstrafik⁹ att minska den fortsatta spridningen av data i radionätet eftersom noderna blir varse var data redan finns tillgängliga.

I militära sammanhang finns ofta en önskan att minimera sändning över radio för att minska risken för upptäckt. Kompletteringen genom datamulor kan då handla om att säkerställa att så lite radiotrafik som möjligt sänds. I situationer där absolut radiotystnad eftersträvas kan all data skickas enbart via datamulor som flyger autonomt hela vägen från sändaren till mottagaren utan att själva använda trådlös synkning. Synkningen kan istället genomföras efter landning via kabel eller byte av lagringsmedier, vilket tas upp mer i avsnitt 3.9. En datamula kan också användas utan att sända trådlös kommunikation genom att vara inkopplad till en lättviktig fiberkabel. Genom att en fiberkabelförsedd mula exempelvis flyger upp och landar på en trädgren kan datamulan ta emot data ifrån en fördelaktig höjd trådlöst och tyst skicka vidare data ner via fibern.

3.8 Informationssäkerhet

En risk med att fysiskt flytta data med en mula är om fienden kommer över den. Genom att vidta ett antal åtgärder kan risken begränsas. Kryptering är ett vedertaget och nödvändigt första steg. Ofta finns redan krypteringslösningar i befintliga LSS med olika former av textskydd. Det är dock ändå en högre risk att låta en datamula transportera data, med egen förmåga att dekryptera dem, än att skicka motsvarande data över radio. Data som skickas mellan två LSS-noder via (en modern) radio har möjligheten att inte bara vara krypterade med ett textskydd på LSS-nivå utan även på radionivå genom radions trafikskydd. Skulle fienden ha kommit över krypteringsnyckeln för LSS-dataunderlaget räcker inte det för att komma åt innehållet i avlyssnad radiotrafik. En röjd nyckel räcker dock för att tillskansa sig information om fienden brutit sig in i en datamula. Därför är det viktigt att göra den manövern så svår som möjligt. Även om nyckeln bara finns i datorns primärminne när en datamula tas över fysiskt finns risken att en kompetent motståndare kan extrahera den. Mer detaljerade analyser om kryptering är utanför denna rapports omfång men är ett viktigt steg för fortsatt undersökning.

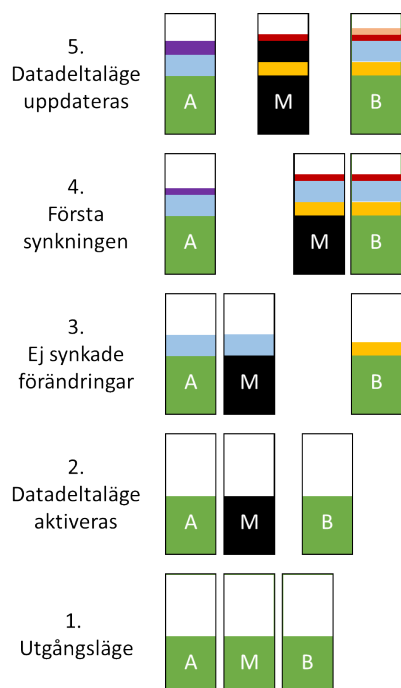
Utöver kryptering finns det andra sätt minska risken för oönskad spridning eller förvanskning av data. Vi tar upp några sätt nedan.

3.8.1 Datadeltaläge

Ett sätt att minska risken att data hamnar i orätta händer är att inte transportera dataunderlaget överhuvudtaget. I ett ledningssystemperspektiv gäller ofta att mycket av dataunderlaget redan är gemensamt mellan noderna i ett nät. När delnät uppstår börjar datamängderna divergera för att sedan åter konvergera när samband upprättas på nytt. Genom att räkna ut vilka data som redan är gemensamma kan dessa data räknas bort från all form av transport av mulorna. Dessutom är det mycket av datatrafiken i ett ledningsnätverk som bara gäller förändringar av befintliga objekt. Data om objekten i sig behöver inte transporteras av mulorna, bara förändringarna.

Att en mula rensar bort data som inte behövs för synkroniseringssyfte kallar vi för datadeltaläge. Figur 5 visar ett enkelt exempel på detta koncept för att minska risken för röjning av information. Förbandsdel A och B samt mulan M börjar samlad i utgångsläget 1. De färgade staplarna representerar nodens ledningsdata där det gemensamma startläget är grönt. I läge 2, precis när förbandsdel B hamnar utanför sambandsräckvidd, aktiveras datadeltaläge. Alla data fram till denna tidpunkt raderas på mulan vilket representeras med svart färg i figuren. Metadata om vilka data som raderats sparas dock. Så snart förbandsdelarna A och B hamnat utanför sambandstäckning börjar deras datainnehåll att divergera vilket åskådliggörs med blå och gul färg i figuren för steg 3. Mulan M förflyttar sig från A, vilken den tappar sambandet med, till B och utför sin första synkronisering så

⁹ Exempelvis utifrån hur LSS-servern STC (SitaWare Tactical Communication) fungerar.



Figur 5: Ett enkelt exempel på konceptet datadeltaläge för att minska risken för röjning av information. Förbandsdel A och B samt mulan M börjar samlad i ett utgångsläge. De färgade staplarna representerar nodens ledningsdata där det gemensamma startläget är grönt. Övriga färger visar förändringar sen startläget. Svart färg representerar data som rensats i och med aktiveringen av datadeltaläge.

snart samband upprättas mellan M och B (steg 4 i figuren). Lila och röd färg visar data som tillkommit under mulans förflyttning. M och B har efter synkningen likvärdiga data förutom den delen av dataunderlaget som rensats i datadeltaläget som fortfarande hålls tomt efter synkningen (svart färg). Så snart synkningen mellan B och M är färdig uppdateras datadeltaläget till att inkludera de data som M förflyttat från A till B. Dessa data är nu nämligen gemensamma för båda förbandsdelarna (steg 5).

Förutom att begränsa datamängden som transporteras och på så vis minska risken för röjning leder datadeltaläge även till fler fördelar säkerhetsmässigt. Med datadeltaläge kan de faktiska data som transporteras på mulan också vara ofullständiga. Exempelvis kan ursprungsläget för förbandsdelarna A och B innefatta en plan med många separata delar som därefter kompletteras separat vid A och B. Bara förändringar kommer därmed att transporteras med mulan. Dessa förändringar kan i sig vara svåra att tolka för en utomstående även om de kommit förbi krypteringen – data fattas helt enkelt.

Exemplet ovan är förenklat med bara två förbandsdelar att ta hänsyn till. Med fler isolerade öar som ska synkas måste mer avancerade algoritmer användas. Om varje mula på något vis kan ta del av information om vilka data övriga LSS-noder (mulor och vanliga noder) har (och inte har) tillgång till skulle datadeltaläget kunna generaliseras till godtyckligt antal noder. Ett sätt att sprida denna information är genom en smalbandig och långsträckt kanal som mulorna har tillgång till. Genom att representera nodens aktuella dataläge och sprida den till övriga noder kan en gemensam förståelse över skillnader i dataläge byggas upp. I ett optimalt fall där den gemensamma förståelsen är fullständig kommer alla mulor att kunna ta optimala beslut om datadeltaläget. I de fall inte alla noder har kontakt med smalbandskanalen kan heuristiska regler användas för att bestämma hur datadeltaläget ska styras. Här går det att justera prioriteten mellan att minimera mulors medhavda data och att potentiellt kunna sprida data: Ska data rensas från en mula först när samtliga noder meddelat att de redan har dataunderlaget, eller ska data rensas om ingen nod inom rimlig tid meddelat att den saknar dataunderlaget? I detta beslut kan även dataunderlagets egen prioritering inkluderas (Viswanathan & Chuah, 2005), helst

beskriven i både termer av hur viktigt det är per varje egen nod och hur känsligt det är för att röjas.

3.8.2 Bryggläge

Noden kan även sättas i begränsat läge genom att inte tillåta att en klient kopplar upp sig och genererar data. En nod i bryggläge kan därmed ses som enbart en förmedlare av befintliga data, inte en källa till nya data. På så vis minskas risken att en datamula tas över av fienden och används som en väg in i ledningssystemet för fientliga data.

3.8.3 Svarta datamulor

Ett sätt att minska risken för att en övertagen datamula leder till att information röjs eller förvanskas är att begränsa datamulan ytterligare från bryggläget ovan. Med en svart datamula menar vi en datamula som inte har egen förmåga att dekryptera de data som den transporterar mellan LSS-noder. En svart datamula har ingen kryptonyckel den kan bli bestulen på. Den behöver inte heller någon LSS-server installerad som riskerar att utnyttjas av fienden. En svart datamula kan dock inte använda samma synkningsmekanismer som en vanlig LSS-nod eftersom den inte kan resonera utifrån dekrypterade data om vad som behöver överföras. I de fall datamulan har tid och kapacitet att föra över stora datamängder vid synkningen är denna begränsning inte nödvändigtvis ett problem. Datamulan kan föra över alla krypterade data till LSS-noden som i sin tur dekrypterar och behåller de som är nya. Om kapaciteten vid synkningen inte är ett problem spelar det ingen roll om 95 % av de överförda datamängderna redan fanns hos LSS-noden. LSS-noden kan därefter analysera vad datamulan saknar, kryptera dessa data och föra över dem till datamulan. I ett läge där olika noders behov av data kan kommuniceras via en alternativ kanal kan en LSS-nod som precis tagit emot alla data från en svart datamula, förutom att komplettera mulans data med det den saknar, dessutom rensa sådana data som ingen efterfrågar innan resulterande datamängd krypteras och återförs till datamulan. En svart datamula får dock inte samma inbyggda förmåga att utnyttja LSS-data för beslut gällande rutter och routing som vi tog upp tidigare. En alternativ variant av svarta datamulor, är mulor som har möjlighet att kommunicera administrativa data med övriga LSS-noder över exempelvis en smalbandig kanal som bara används för dess egna beslutfattande för routing, ruttplanering och synkning. Om krypterade data taggas upp med unika identifierare som sprids via denna administrativa kanal finns möjligheter för den svarta datamulan att synka data utan att dekryptera dem.

3.8.4 Övriga cyberhot

För beskrivningar av vanliga cyberattacker som även är relevanta för den typen av datorsystem vi beskriver i datamulningen och för genomgångar av cyberhot som är mer specifikt riktade till UAV:er finns ett stort aktivt forskningsfält att ta del av (Ly & Ly, 2021; Gudla m.fl., 2018; Rani m.fl., 2016; Yağdereli m.fl., 2015).

3.9 Tekniker för informationsutbyte

Hittills har vi framförallt beskrivit synkronisering av data genom snabba men kortsträckviddiga radioförbindelser som Wi-Fi. Att föra över data över Wi-Fi är smidigt eftersom det kan ske under förflyttning och från relativt hög höjd med fri sikt. Vid tillräckligt litet avstånd kan överföringshastigheten dessutom vara hög. Tekniken är dessutom vanlig, billig och lätt att sätta upp. Även om snabb radiokommunikation såsom Wi-Fi kan komma upp i höga överföringshastigheter, finns det en brytpunkt där datamängderna att föra över är så stora att andra metoder för dataöverföring blir intressanta.

3.9.1 Synkronisering via tråd

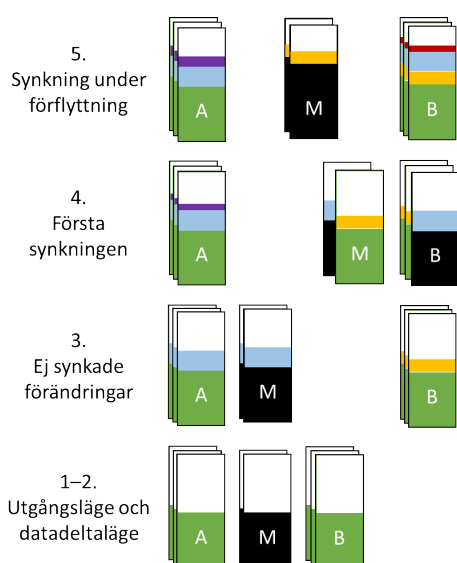
En inkommande datamula med stora datamängder kan istället för att överföra data över Wi-Fi, landa vid lämplig kommunikationscentral och kopplas in via kabel med hög kapacitet. Datatakten kan då ökas betydligt. En naturlig negativ aspekt med detta tillvägagångssätt är att datamulan blir låst under tiden överföringen sker.

Om datamulan väl landat och befinner sig åtkomlig i en kommunikationscentral är ett alternativ till att koppla in den via kabel att helt enkelt fysiskt byta lagringsmediet ombord. Genom att se till att mulan har en extra uppsättning av lagringsmedium som kan bytas ut under drift innehållande ett redundant duplikat av alla data kan synkroniseringen snabbas upp betydligt.

3.9.2 Synkronisering via mediebyte

Om datamulan har ett lagringssystem som speglas på två lagringsmedier där minst det ena är enkelt löstagbart kan synkroniseringen ske genom att byta medier. Genom att säkerställa att även de markbaserade noderna har en uppsättning av likadana lagringsmedier kan medier från de två olika noderna bytas när en mula kommer fram. Istället för synkning via nätverket när mulan kommer till en mottagande förbandsdel, byts fysiskt mulans ena lagringsmedium mot ett av de i mottagande förbandsdel. Mulans ena lagringsmedia sätts in i den markbaserade nodens medierack och ett av marknodens medier sätts in i mulan. När medierna bytts kan data synkas mycket snabbt lokalt på noderna. Eftersom synkroniseringen sker lokalt finns ingen anledning att mulan är stationär under tiden och direkt efter bytet kan den därmed fortsätta sin rutt. Genom att kombinera lagringsmedium och batteri i samma kassett kan själva stoppet utnyttjas för ett syfte till.

I Figur 6 visas ett enkelt exempel på hur synkning via mediebyte kan fungera. Förbandsdelarna A och B har flera (under drift löstagbara) uppsättningar av sina ledningsdata (representeras av tre kopior av staplarna i figuren). Även datamulan M har en extra uppsättning av ledningsdata. I normal drift sparas data alltid till samtliga uppsättningar både på mulan och för marknoderna vilket representeras med likformigt färgade stackade staplar i figuren. I steg 1–2 har förbandsdelarna A och B och mulan M kontakt med samma nätverk och är likvärdiga gällande datainnehållet förutom att mulan aktiverat datadeltaläge och rensat bort alla data som redan är gemensamma för A och B. I steg 3 har förbandsdel B hamnat utanför täckning till både A och M och A och B har börjat divergera gällande datainnehållet (vilket åskådliggörs med blå och gul färg). När mulan M nått förbandsdel B i steg 4 byter en operatör ut mulans ena lagringsmedium med ett i förbandsdelens B medierack. Notera i figuren hur både mulan M och förbandsdel B nu har medier med olika innehåll i sina rack. Mulan kan sedan direkt skickas tillbaka med dessa två olika uppsättningar ledningsdata (mulans gamla och förbandsdelens nya). Dessa två uppsättningar ledningsdata synkas snabbt under färd till att bli likvärdiga enligt steg 5. I steg 5 syns också hur mulan aktiverat datadeltaläge och därmed rensat bort alla data



Figur 6: Synkronisering via fysiskt byte av lagringsmedier. Förbandsdelarna A och B har flera (under drift löstagbara) uppsättningar av sina ledningsdata (representeras av tre kopior av staplarna i figuren). Även datamulan M har extra uppsättning av ledningsdata. I normal drift sparas data alltid till samtliga uppsättningar. Istället för synkning via nätverket när mulan kommer till en mottagande förbandsdel, byts fysiskt mulans ena lagringsmedium mot ett av de i mottagande förbandsdel. Mulan kan sedan direkt skickas tillbaka med två olika uppsättningar ledningsdata (mulans gamla och förbandsdelens nya). Dessa två uppsättningar ledningsdata synkas under färd till att bli likvärdiga. På samma sätt kommer förbandsdelens uppsättningar med lagringsmedier att synkas utifrån det medium som kom från mulan.

utom de som kom från förbandsdel B (gult i figuren). På samma sätt kommer förbandsdelen B:s uppsättningar med lagringsmedier att synkas utifrån det medium som kom från mulan. De lila och röda segmenten i A och B är data som skapats under tiden M förflyttat sig. När mulan kommer fram till A kommer medierna återigen att byta plats och den gula delen i M kommer kopieras till A och den lila delen i A kommer att kopieras över till B via M.

3.10 Scenarion

För att underlätta att analysera konceptet datamulning för militär ledning presenterar vi tre konkreta scenarion där vi använder de olika begreppen som introducerats tidigare i rapporten. Att använda datamulor på det sättet vi beskriver i scenariona finns inte beskrivet i litteraturen och vi har heller inte hittat några befintliga praktiska implementationer som spänner över alla delarna som tas upp här. Därmed råder stor osäkerhet i hur mycket som är praktiskt genomförbart. Dessa scenarion är alltså till för att förtydliga konceptet med datamulor, inte att visa vad som är möjligt nu i praktiken. I de grova beräkningarna nedan har vi valt att sätta överföringshastigheten för Wi-Fi till ungefär 150 Mbit/s och datamulans maximala hastighet till 100 km/h. Utmaningarna i dessa scenarion tas upp i avsnitt 4.1.

3.10.1 Förmedling av planeringsprodukter inom en brigadstab

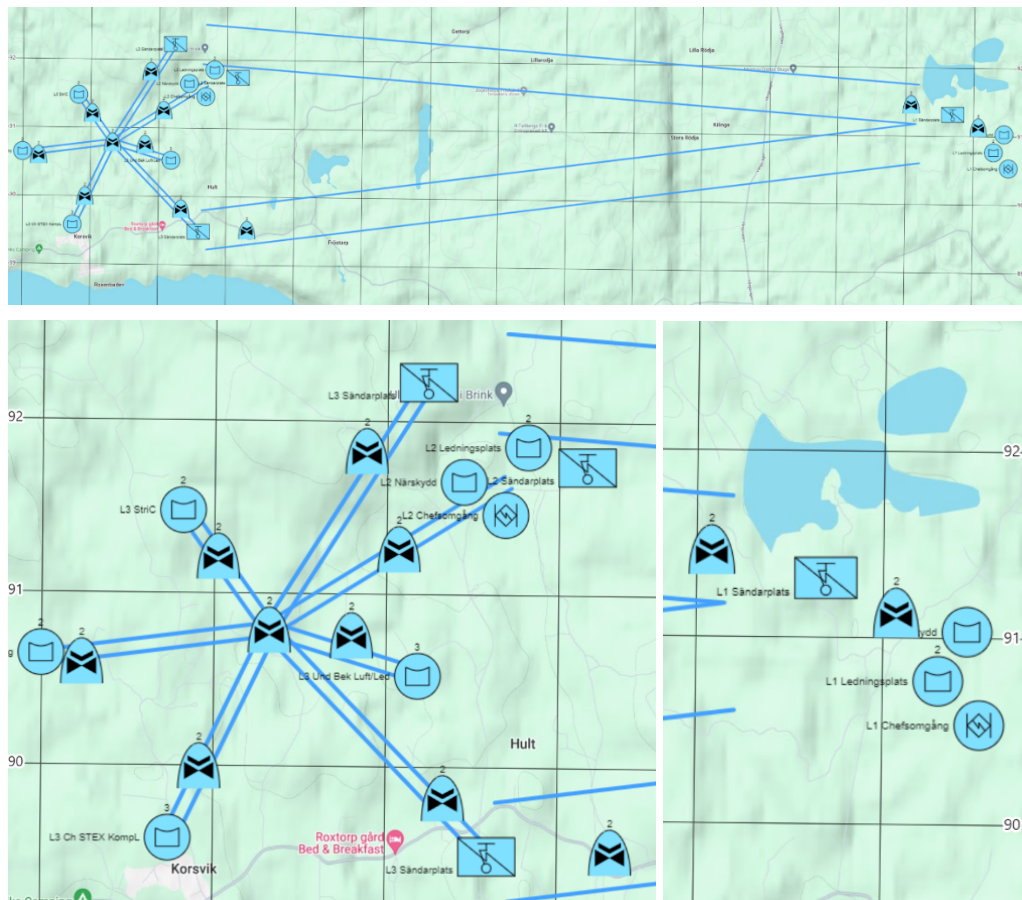
Med planeringsprodukter menar vi i detta fall den typ av data som genereras vid planering, ordergivning och tillhörande ledning som sker inom en brigadstab och som normalt har ett tidsperspektiv på flera timmar.

Anta att en brigads L3 är grupperad i fyra nästen, två sändningsplatser och en L2 i närheten. L1 är grupperad 12 km österut närmare fronten (Figur 7). Nästena, sändningsplatserna och L2 har enbart förbindelse via taktisk radio och datamulor eftersom fiber ännu inte har hunnit dras och osäkerhet råder huruvida omgruppering behöver ske i närtid.

L3:s sändarplatser har kontakt med L1:s sändarplats enbart via smalbandig radio och datamulor eftersom radiolänksystemen är ur drift. Datamulorna är utrustade med Wi-Fi och samma smalbandiga radio som sändarplatserna. Över smalbandet kan noder meddela sin position, sina besökta noders behov av tömning, och andra metadata medan Wi-Fi används för synkning av data. I scenariot antas att talsamband och mindre textmeddelanden är möjliga att sända mellan nästena och mellan L3 och L1 via radio.

Brigaden har 22 likadana datamulor och har fördelat dem enligt Figur 7. Två datamulor har skickats till centrala positioner i centrumunkten av alla nästen och grupperat i trädtoppar. Två mulor per näste (och sändningsplatser och L2) flyger fram och tillbaka till denna centrumpunkt för att synka data vilket i genomsnitt är en sträcka på 1 km. På en minut hinner mulorna flyga sträckan och sakta in i drygt 20 s för att synka. Hela rutten tar 2 min fram och tillbaka och med två mulor per näste kommer en mula i snitt synka data med centrummulorna varje minut. På samma vis kommer en mula från ett annat näste att ta vidare dessa data till sitt näste en gång per minut. Den maximala fördröjningen mellan två nästen blir då 4 minuter, den minsta blir 2 minuter och medelfördröjningen 3 minuter. Vid varje synkning kan mulan maximalt synka ~400 MB (baserat på drygt 20 s förbindelse). Tillsammans ger dessa värden en maximal dataakt på över 50 Mbit/s.

Den längre sträckan till L1 är 12 km och totalt fyra datamulor flyger den sträckan, två från varje sändarplats. Sträckan tar 8 minuter där en knapp minut är synkning. Med fyra mulor i rutten kommer en synkning ske vid L1 en gång var fjärde minut. Den maximala fördröjningen mellan ett näste i L3 och L1 blir 16 minuter, den minsta blir 10 minuter och medelfördröjningen 13 minuter. Vid varje synkning kan mulan maximalt synka ~900 MB (baserat på en knapp minuts förbindelse). Tillsammans ger dessa värden en maximal



Figur 7: Scenario 1. Planering med datamulor som stöd i en brigad bestående av L3 med nästen (vänster i bild) och L1 (höger i bild). Översta bilden ger en översikt och undre bilden zoomar in på L3 respektive L1.

dataakt på ~30 Mbit/s. På grund av den dubbla rutten (från två olika sändarplatser i L3) måste mulorna kommunicera via smalbandiga kanalen för att minska dubbelsändning av data. Görs inte det kommer 50 % av inkommande data vid L1 vara redundanta över tid. Vid L1 antas att två datamulor täcker hela området som radiobryggor eftersom delarna är grupperade så pass nära varandra.

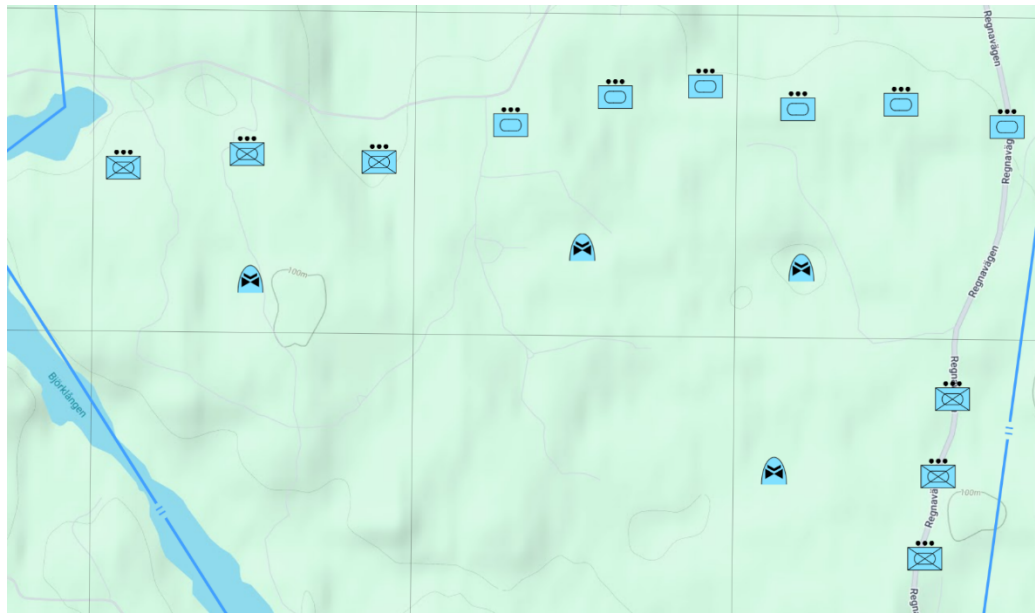
Antag att situationen förändras och stora datamängder börjar komma in till L1 från bataljonerna (t.ex. en situation liknande scenario 3 nedan). Om mulorna har dynamisk styrd ruttplanering kan de automatiskt fördela om rutterna baserat på bland annat mängd inkomna data, prioritet och tidskrav genom att kommunicera beslutet över smalband. I vårt scenario fördelas L3:s extra mulor om till att istället flyga rutten till L1 och nästenas datamulning sköts istället av en mula per näste. Sex mulor extra, totalt tio, flyger då rutten mellan L3 och L1. Inom L3 går då fördröjningen upp till maximalt 6 minuter (2 minuter minimum och 4 medel) medan maximal dataakt går ner till drygt 25 Mbit/s. För mulningen mellan L3 och L1 minskar fördröjningen marginellt (12,8 minuter i medel) men dataakten ökar mer än dubbelt till 75 Mbit/s.

Alla värden i detta scenario utgår ifrån att mulorna får kontakt över Wi-Fi enbart när de nått fram hela vägen. I verkligheten kommer datamulor att få kontakt oftare när de flyger mellan nästena. I vissa fall kommer datamulorna att agera radiobryggor. Beräkningarna utgår dessutom ifrån att det alltid genomförs en komplett synkningsperiod och därmed att det alltid finns så mycket data att synka att hela den perioden används för dataöverföring. I verkligheten kan det röra sig om betydligt mindre mängder data. Dessa två omständigheter kan göra att synkningen redan är klar efter en del av sträckan och datamulan kan därmed vända. Ruttplaneringen i exemplet skulle med stor sannolikhet kunna optimeras genom att använda någon av många tillgängliga ruttplaneringsalgoritmer. Batteribyte, laddning och utbyte av datamulor tas inte upp här men kommer vara en viktig del av planeringen.

3.10.2 Förmedling av tidskritisk lägesinformation inom en bataljon

Med lägesinformation menar vi i detta fall den typ av allmänt viktig information som behövs för att leda förband i tidskritiska skeden. Informationen omfattar egna positioner, kartbaserade rapporter, textmeddelanden och enklare kartlager med taktiska symboler. Dessa data behöver spridas relativt fort mellan enheter i förband och kommunikationen sker vanligtvis via bredbandig taktisk radio. Denna typ av scenario är utmanande för en lösning med datamulor på grund av fördröjningar.

Anta att en pansarbataljon framrycker enligt Figur 8: Tre kompanier i bredd med ungefär 2,5 km mellan västligaste och östligaste vagnen och ett kompani i kolonn en knapp kilometer söder om östligaste kompaniet. Vagnarna i de tre främre kompanierna framrycker med ungefär 100 m mellanrum medan kolonnen bakom har ungefär 50 m mellan vagnarna. En datamula per kompani används initialt som radiobryggor för att skapa redundans. Förbandet utsätts sedan för störning och radions räckvidd minskar så kraftigt att den inte når mellan två grannvagnar i de främre kompanierna. Datamulorna upptäcker att data slutar att komma in från LSS-noder och börjar därmed förflytta sig närmare tills de till slut byter roll till LSS-bryggor. Tre datamulor startar en rutt längs med frontvagnarnas linje på 2,5 km. De flyger jämt fördelat fram och tillbaka så nära vagnarna som behövs för att få förbindelse. Eftersom det är relativt små datamängder som genereras per vagn saktar datamulorna inte in vid överflygning. Det blir knappt 4 s mellan varje vagn och på ungefär 2 s som kontakt finns (25 m innan och efter varje vagn) räknar vi med att tillräckligt med data kan utbytas. Rutten tar 3 minuter ($2 \times 2,5$ km) och med 3 datamulor kommer en datamula passera varje vagn en gång i minuten. Vid synktillfället kommer data vara ~4–90 s gamla där grannvagnar har den minsta fördröjningen. För att exemplifiera med positioner så kommer en vagns uppfattning om en annan vagns position vara som äldst precis innan en datamula har synkat, alltså när vagnen väntat i 1 minut. Positionsuppdateringarna för övriga vagnar hos den väntande vagnen är då ungefär 1–2,5 minuter gamla.



Figur 8: Scenario 2. Pansarbataljon under framryckning där datamulor förmedlar data när förbandet hamnar i ett stort läge.

En ensam datamula tar hand om rutten från det östligaste kompaniet och söderut till det bakre kompaniet som framrycker i kolonn. Det tar ungefär 2 minuter att flyga rutten fram och tillbaka ($2 \times 1,5$ km). Datamulan kommer att passera varje vagn varannan minut och icke-bryggade data är då ~ 4 –120 s gamla. Vid en specifik LSS-nod är icke-bryggade positioner 2–3 minuter gamla precis innan en datamula kommer. Bryggade positioner, alltså sådana positioner som skickats vidare mellan de två rutterna, kommer på grund av bryggningen att få högre fördröjning. En position från den västligaste plutonen kommer hos den sydligaste plutonen som mest att vara 5,5 minuter gammal efter att ha bryggats vid östligaste plutonen. Denna beräkning förklaras genom att positionen från den västligaste plutonen som mest är 2,5 minuter gammal vid bryggnoden i östligaste plutonen när nästa rutts mula kommer och hämtar positionen och flyger 1 min till sydligaste plutonen som sedan får vänta 2 minuter på nästa uppdatering. Åt andra hållet så kommer en position från sydligaste plutonen också att vara 5,5 minuter som äldst hos den västligaste plutonen. Beräkningen görs på motsvarande sätt då en position från sydligaste plutonen som mest är 3 minuter gammal vid bryggnoden när en datamula ur nästa rutt hämtar positionen och flyger 1,5 minuter till västligaste plutonen som får vänta 1 minut på nästa uppdatering.

3.10.3 Förmedling av stora mängder sensordata

Där det förra scenariot handlade om att förmedla allmänt viktiga data som enheters positioner, rapporter och textmeddelanden tittar vi nu istället på motsatsen: stora datamängder som används för en mer specifik uppgift.

Anta att fyra ingenjörsplutoner disponerar ett antal sensorer var som samlar in data genom lasermätningar för att skapa ett högupplöst laserpunktsmoln och högupplöst video för att skapa texturer (Figur 9). Varje pluton har också två datamulor var som åker i en rutt över sensornoderna och sen till en insamlingsnod en bit från kompaniets ledningsplats. Mulorna flyger över sensornoderna en gång var femte minut och insamlingsnoden en gång var femte minut. Mulorna är av typen överflygare som synkroniserar data under förflyttning. Varje mula kan kopiera 1 GB data när de flyger över sensornoderna under 1 minut. Samtliga fyra plutoner levererar data på detta vis och totalt 8 GB fylls på var femte minut vid kompaniet. Sensorerna ligger 4 km från kompaniets insamlingsnod.

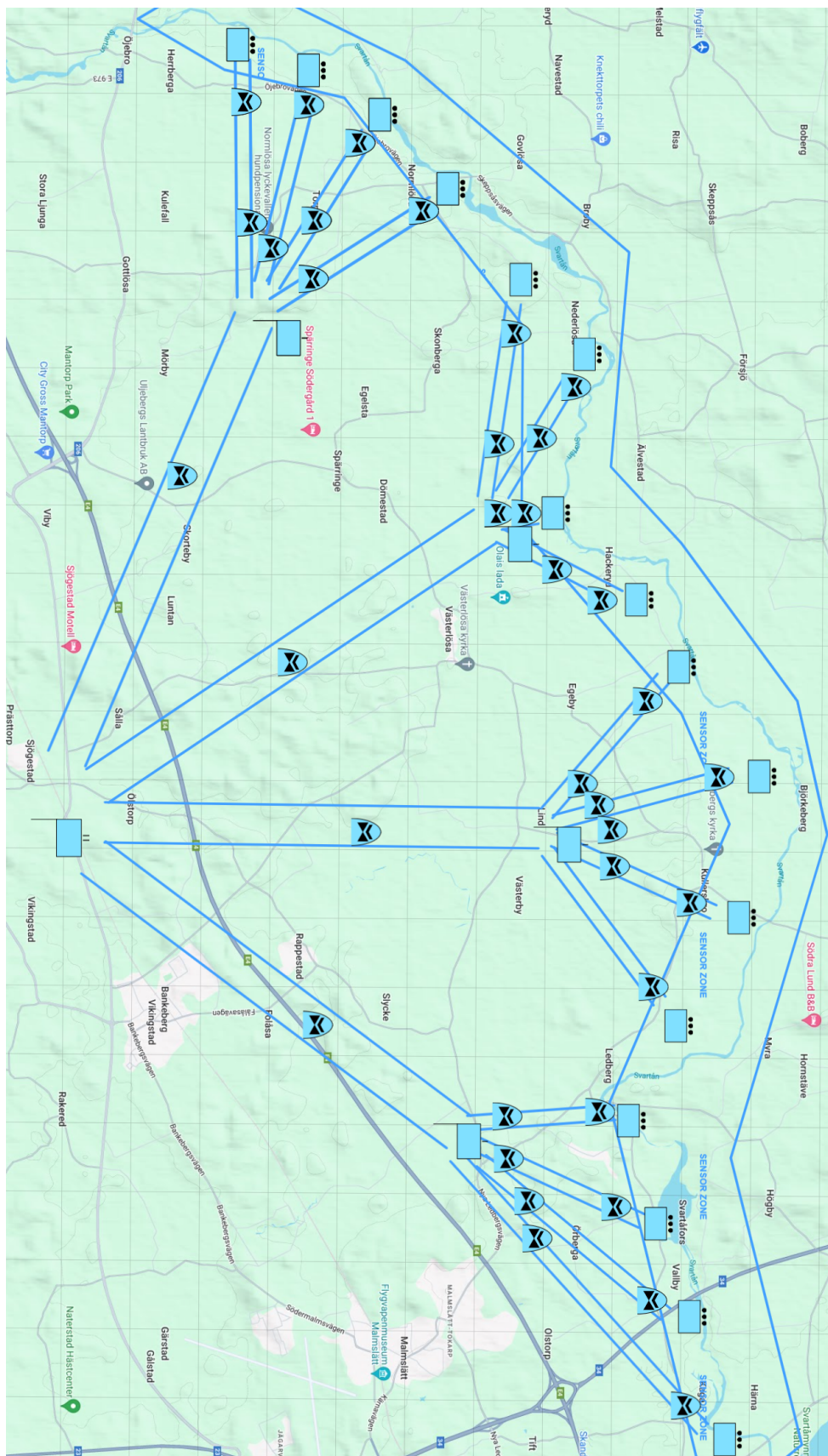
Vid kompaniet finns ett kassettrack med speglade lagringsmedier och inbyggda batterier anpassade för synkronisering via mediabyte för en större mula. Lagringsmedierna innehåller ledningssystemets samlade data. En gång var tionde minut kommer en större datamula från ingenjörsbataljonens främre ledningsplats och dess kassett byts ut mot en i racket och mulan skickas sedan omgående tillbaka till bataljonen. Under flygningen tillbaka kopieras 16 GB data för att synka de två medierna lokalt på mulan. Samtidigt, i kompaniets kassettrack, synkas mulans nya data från bataljonen så att alla kassetter blir likvärdiga. Bataljonens insamlingsnod ligger 8 km från kompaniets insamlingsnod. Vid bataljonen kommer mulor in från fyra olika kompanier vilket ger 64 GB inkommande data var tionde minut.

I genomsnitt kommer de inkomna dataunderlagen att ha följande ålder:

- De små mulorna på plutonerna efter att överflygning av sensornoderna: 0–6 minuter (1 minut överflygning och kopiering, 1,5 minuter förflyttning till kompaniet, 1 minut överflygning och kopiering vid kompaniet och 1,5 minuter tillbaka till sensornoder).
- De små mulorna på plutonerna efter att ha kopierat till kompaniet: 2,5–8,5 minuter
- Stora mulan vid överlämningen vid bataljon: 7,5–13,5 minuter (5 minuter enkel väg och ett snabbt kassetbyte).

Sammanfattningsvis skulle detta scenario, med 36 mulor av två olika varianter, överföra data från ett 20 km brett sensorområde i över 800 Mbit/s till en bataljonsledningsplats på ett avstånd på 12 km med en medelfördröjning på ca 10–15 minuter.

Förutom överföring av sensordata så kan övriga ledningsdata synkas enligt första scenariot. Samtliga plutoner kommer alltså ha möjligheten att få samtliga andra plutoners ledningsdata synkroniserade via samma datamulor som används för de stora datamängderna med en medelfördröjning på 20–30 minuter. Med tanke på den stora fördröjningen är den lösningen därmed inte lämplig för den typen av data. Ledningsdata i form av positioner och annan lägesbildsinformation kan istället skickas via dedikerade datamulor som har en mer yttäckande rutt över samtliga plutoner. Alternativt kan en taktisk radio med multihopp via plutonerna användas för den typen av data i detta scenario.



Figur 9: Scenario 3. Datamulor som hämtar in stora mängder data för en specifik uppgift.

4 Diskussion

4.1 Realiserbarhet

De flesta koncepten som tagits upp i rapporten har funnits under en relativt lång tid och forskning om dem har lett till fungerande implementationer. Men för koncepten tillsammans, som en helhet – datamulning för militär ledning – har vi inte hittat några större studier eller färdiga lösningar. När det gäller prestanda på UAV:er som exempelvis hastighet, lastkapacitet, batteriförbrukning och övrig uthållighet görs ingen djupare analys i denna rapport eftersom området är omfattande och utvecklas snabbt¹⁰. De bedömningar som görs i rapporten är därmed spekulativa och framåtblickande och bör ses som tankespår för en vidare dialog med uppdragsgivaren och andra intressenter snarare än en specifikation av framtida lösningar.

Med det sagt torde de enkla delarna i konceptet datamulning för ledning kunna realiseras med kommersiellt tillgänglig hårdvara och mjukvara utan större utvecklingsbehov; speciellt för prov och försök. En kommersiell eller befintlig militär UAV kan kompletteras med en liten dator (t.ex. Raspberry Pi) eller mobiltelefon där en lättviktig server för stridsledningssystem installeras. Lättviktigheten behövs både i termer av oansenliga prestandakrav och enkel administration av ett flertal dynamiskt föränderliga noder. Som ett exempel kan Systematics serverprogramvara STC (SitaWare Tactical Communication) köras på mobiltelefoner (Android) eller små Linux-system och användas för alla klienter i SitaWare-familjen: Edge, Frontline och Headquarters. Genom att ställa in denna server att kommunicera på ett Wi-Fi-nät som även övriga LSS-noder är uppkopplade mot, kommer programvarans inbyggda synkningsalgoritmer att kunna användas för att testa grunderna i datamulning eftersom den redan är anpassad för att hantera avbrott i samband. Enkla statiska ruttor med GNSS-navigering eller manuell navigering kräver ingen utveckling. På så vis är tröskeln låg att komma igång att utforska datamulning.

Övriga koncept som presenteras i rapporten kräver utveckling. Säkerhetsfunktioner som datadeltaläge och brygggläge kräver utveckling av mjukvaran. Svarta datamulor kräver ett alternativ till befintliga stridsledningssystem för att synkronisera krypterade data. Synkronisering via mediabyte kräver utveckling av både mjukvara och hårdvara. Ruttplanering och ruttoptimering är ett stort område men där det finns mycket befintlig kunskap att tillgå. Navigering utan GNSS är en utmaning, speciellt i höga hastigheter och svår terräng, men flera olika upplägg beskrivs i rapporten.

När det gäller scenariona har vi bortsett från batteribyte, laddning och utbyte av datamulor som i verkligheten kommer vara en viktig del av planeringen. Ruttplaneringen i scenariona skulle med stor sannolikhet kunna optimeras genom att använda någon av många tillgängliga ruttplaneringsalgoritmer och därmed öka prestandan. I scenario 2 görs antagande att det går att lösa synkning av data under mycket snabba överflygningar. De kommersiella LSS-servrar vi känner till kan inte identifiera synkningsbehoven på så kort tid och måste optimeras liknande de tekniker som redovisats tidigare i rapporten där Wi-Fi-överföring i storleksordningen megabyte kunde ske vid passage i 180 km/h. En LSS-nod måste i det fallet vara redo att snabbt skicka över det den tror är viktigast till en datamula (och tvärtom) enligt någon form av heuristik. Att hinna fundera på exakt vad som skiljer mellan de två noderna bedömer vi som svårt. Om datamulorna har tillgång till en långgräckviddig kanal kan bedömningen om vilka data som bör överföras förfinas via den. Gällande en blandning av smalbandig men kontinuerlig förbindelse och datamulors stötvisa överföring av större datamängder, kan generellt sägas att ett LSS behöver hantera

¹⁰ En liten och billig (ca: 25 000 kr) kommersiell UAV (Mavic 3 Pro) har en maximal hastighet på 75 km/h, 40 minuters flygtid och en lastkapacitet på 500 g. En Raspberry Pi med Wi-Fi- och LoRa-modul väger tillsammans 120 g. Matrice 350 RTK är en större och dyrare variant (ca: 125 000 kr) med dubbla lastkapaciteten, en flygtid på 55 minuter och maximal hastighet på 85 km/h. Alla värden kommer från produktleverantörerna, gäller bara var för sig och har inte bekräftats i detta arbete.

denna kombination sömlöst. Ett praktiskt exempel är att vissa data (t.ex. ett textmeddelande och en position) skickas via taktisk radio medan en stor tillhörande bilaga (t.ex. en filmsekvens) omdirigeras till en datamula. Navigeringen i scenario 2 är ett utmanande problem där datamulor i hög hastighet ska flyga tillräckligt nära alla vagnar som dessutom är under framryckning. Här behövs mer arbete för att bedöma realiserbarheten.

4.2 Fortsatt arbete

Vi har i denna rapport beskrivit ett koncept och presenterat några framåtblickande scenarion. Efter denna leverans finns det några lämpliga spår för fortsatt arbete som behöver löpa parallellt.

4.2.1 Analysera teknik

Tekniken som är involverad i datamulning – UAV:er, radiosystem, LSS-programvara, algoritmer för navigering, ruttplanering och datasynkronisering – behöver analyseras och bedömas utifrån vad som kan realiseras när och till vilken kostnad. På samma vis behöver utvecklingsbehov identifieras. Cybersäkerhetsfrågor är en viktig del i denna analys och behöver potentiellt en egen utredning. En konkret uppgift är även att undersöka hur befintliga radiosystem som exempelvis Ra570 skulle kunna fungera för datamulning. I detta arbete behövs dialog med ett flertal systemexperter och tekniska verifikationer av de olika delarna.

4.2.2 Identifiera scenarion

Tillsammans med Försvarmakten och andra experter behöver scenarion tas fram där datamulning bedöms ha en potential att stödja befintliga uppgifter. För vilka typer av data och situationer kan datamulornas fördröjda och ojämna kommunikation accepteras? I vilka situationer kan bedömd nytta överväga riskerna med olika typer av datamulor? Genom att erbjuda flera olika lösningar ges större valmöjligheter för de som behöver bedöma nytta och risk i ett skarpt läge. Scenariona i denna rapport kan utgöra tankegodis inför en gemensam workshop för att hitta mer grundlagda exempel. Begreppen som introduceras i rapporten kan användas för att beskriva dessa nya scenarion.

4.2.3 Utveckla metod

Det är en sak att hitta befintliga uppgifter som kan stödjas med datamulning. När det gäller nya möjligheter finns åtskilligt att undersöka och utveckla. Exempelvis, i scenario 3 överförs mycket stora datamängder på ett sätt som möjligtvis är svårt att tänka sig ett behov för. Många gigabyte insamlade data kanske inte kan tas om hand effektivt av operatörer, men dock är AI-assistans ett område där stora datamängder är efterfrågade.

4.2.4 Genomföra försök och experiment

Genom radiosimuleringar kan vi ta fram ett underlag till hur förbindelsen mellan datamulor och LSS-noder uppstår och försvinner. Dessa underlag kan vi sedan använda för att skapa scenarion i vår virtuella testbädd där riktiga LSS utsätts för verklighetstroga förändringar i förbindelser och där vi kan analysera synkningen av data mellan noderna (Albinsson m.fl., 2023). Sådana tester kan påbörjas i närtid. Vissa funktioner kan även testas med fysisk utrustning. Här finns möjligheter att samverka med flera andra forskargrupper vid FOI.

5 Slutsats

Även om datamulning för militär ledning är ett omoget område med många frågetecken, bedömer vi att det visar tillräcklig potential för att undersökas vidare. I denna rapport har vi ritat upp några typer av utmaningar inom militär ledning som skulle kunna tacklas genom att använda datamulor. Dock är militär ledning ett komplext problem att ta sig an och det finns inga entydiga lösningar. Vi föreslår därför att direkt börja med olika typer av försök och experiment med datamulning för att på så vis inte bara börja lösa problemet utan även *förstå* problemet.

Avancerade uppsättningar av ett stort antal samarbetande datamulor är inte realiserbart på kort tid eftersom mjukvara för bland annat ruttplanering, samarbete mellan mulor och synkning av data måste utvecklas. Men om vi nöjer oss med en ad-hoc tillämpning där alla datamulor agerar likvärdigt och synkar enligt standardförfarandet för ett befintligt ledningsstödsystem kan en grundfunktionalitet uppnås med multipla mulor även om rutter, samarbete och synkning inte optimeras. Ett sådant upplägg möjliggör en snabb startsträcka för att börja sätta sig in i konceptet.

Samtidigt kan mer övergripande frågor avhandlas: Vilka typer av datamulning är lämpliga och under vilka förutsättningar? Vilka befintliga uppgifter kan stödjas och vilka nya uppgifter kan realiseras? Var kan opportunistisk datamulning ske? Eftersom användningen av UAV:er generellt är ett område under snabb utveckling är det viktigt att få med de här tankarna när olika typer av UAV:er introduceras i Försvarmaktens förband.

6 Referenser

- Albinsson, P. A., Granåsen, D., Hermelin, J. & Thorstensson, M. (2023). Virtual Testbed for Cost-Effective Evaluation of C2 Support Systems: Practical Examples from the Swedish Armed Forces. In *28th International Command and Control Research and Technology Symposium*.
- Aspnes, J., Eren, T., Goldenberg, D. K., Morse, A. S., Whiteley, W., Yang, Y. R., Anderson, B. D. O. & Belhumeur, P. N. (2006). A theory of network localization. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 5(12), 1663–1678.
- Bark, G., Grönkvist, J., Hansson, A., Häggglund, K., Komulainen, A. & Rydell, J. (2021). Autonomi UAV:er för kraftigt ökad kapacitet i mobila taktiska nät. FOI-R--5196--SE. Totalförsvarets forskningsinstitut.
- Bekmezci, I., Sahingoz, O. K., & Temel, Ş. (2013). Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*, 11(3), 1254–1270.
- Brynielsson, J., Cohen, M., Kamrani, F. & Oskarsson, D. (2022). Patrullering med poker-AI: Systematiskt oförutsägbart patrullering i sjö, mark och cyberrymd. FOI-R--5291--SE. Totalförsvarets forskningsinstitut.
- Cao, X., Yang, P., Alzenad, M., Xi, X., Wu, D., & Yanikomeroglu, H. (2018). Airborne communication networks: A survey. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36(9), 1907–1926.
- Chávez, K., & Swed, O. (2023). Emulating underdogs: Tactical drones in the Russia-Ukraine war. *Contemporary Security Policy*, 44(4), 592–605.
- Chi, W., Low, K. H., Hoon, K. H., & Tang, J. (2014). An optimized perching mechanism for autonomous perching with a quadrotor. In *2014 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)* (pp. 3109–3115). IEEE.
- Chuah, M. C., & Yang, P. (2005). A message ferrying scheme with differentiated services. In *MILCOM 2005-2005 IEEE Military Communications Conference* (pp. 1521–1527). IEEE.
- Di Francesco, M., Das, S. K., & Anastasi, G. (2011). Data collection in wireless sensor networks with mobile elements: A survey. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 8(1), 1–31.
- Eriksson, J., Balakrishnan, H., & Madden, S. (2008). Cabernet: Vehicular content delivery using WiFi. In *Proceedings of the 14th ACM international conference on Mobile computing and networking* (pp. 199–210).
- Fall, K. (2003). A delay-tolerant network architecture for challenged internets. In *Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications* (pp. 27–34).
- Försvarsmakten (2022). Ett starkare försvar för en utmanande framtid; Slutredovisning av Försvarsmaktens perspektivstudie 2022.
- Gargalakos, M. (2021). The role of unmanned aerial vehicles in military communications: application scenarios, current trends, and beyond. *The Journal of Defense Modeling and Simulation*.
- Griffin, B., Fierro, R., & Palunko, I. (2012). An autonomous communications relay in GPS-denied environments via antenna diversity. *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 9(1), 33–44.
- Grönkvist, J., Hansson, A., Komulainen, A., Sköld, M., Sterner, U. & Uppman, U. (2024). Radionät för markförband – Slutrapport. FOI-R--5531--SE. Totalförsvarets forskningsinstitut.

- Gudla, C., Rana, M. S., & Sung, A. H. (2018). Defense techniques against cyber attacks on unmanned aerial vehicles. In *Proceedings of the international conference on embedded systems, cyber-physical systems, and applications (ESCS)* (pp. 110–116).
- Gyagenda, N., Hatilima, J. V., Roth, H., & Zhmud, V. (2022). A review of GNSS-independent UAV navigation techniques. *Robotics and Autonomous Systems*, 152, 104069.
- Hayat, S., Yanmaz, E., & Muzaffar, R. (2016). Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4), 2624–2661.
- Hinds, A., Ngulube, M., Zhu, S., & Al-Aqrabi, H. (2013). A review of routing protocols for mobile ad-hoc networks (manet). *International journal of information and education technology*, 3(1), 1.
- Jea, D., Somasundara, A., & Srivastava, M. (2005). Multiple controlled mobile elements (data mules) for data collection in sensor networks. In *Distributed Computing in Sensor Systems: First IEEE International Conference, DCOSS 2005* (pp. 244–257).
- Jeong, S., Simeone, O., & Kang, J. (2017). Mobile edge computing via a UAV-mounted cloudlet: Optimization of bit allocation and path planning. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(3), 2049–2063.
- Juang, P., Oki, H., Wang, Y., Martonosi, M., Peh, L. S., & Rubenstein, D. (2002). Energy-efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with ZebraNet. In *Proceedings of the 10th international conference on Architectural support for programming languages and operating systems* (pp. 96–107).
- Lee, J. S., Yoo, Y. S., Choi, H., Kim, T., & Choi, J. K. (2020). Group connectivity-based UAV positioning and data slot allocation for tactical MANET. *IEEE Access*, 8, 220570–220584.
- Li, B., Fei, Z., & Zhang, Y. (2018). UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2), 2241–2263.
- Lu, N., Cheng, N., Zhang, N., Shen, X., & Mark, J. W. (2014). Connected vehicles: Solutions and challenges. *IEEE internet of things journal*, 1(4), 289–299.
- Ly, B., & Ly, R. (2021). Cybersecurity in unmanned aerial vehicles (UAVs). *Journal of Cyber Security Technology*, 5(2), 120–137.
- Mertens, J. S., Milotta, G. M., Nagaradjane, P., & Morabito, G. (2020). SDN-(UAV) ISE: Applying software defined networking to wireless sensor networks with data mules. In *2020 IEEE 21st International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks* (pp. 323–328). IEEE.
- Mountcastle, Z., Slosarik, M., Delaney, D., & Pan, J. (2021). Evaluating the Use of Unmanned Aircraft Systems to Autonomously Download Ground-Based Sensor Data. In *2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (pp. 1–6). IEEE.
- Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Nam, Y. H., & Debbah, M. (2019). A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems. *IEEE communications surveys & tutorials*, 21(3), 2334–2360.
- Orfanus, D., Eliassen, F., & de Freitas, E. P. (2014). Self-organizing relay network supporting remotely deployed sensor nodes in military operations. In *6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)* (pp. 326–333). IEEE.
- Ott, J., & Kutscher, D. (2004). Drive-thru Internet: IEEE 802.11 b for “automobile” users. In *IEEE INFOCOM 2004* (Vol. 1). IEEE.

Pan, J., Slosarik, M., Delaney, D., & Mountcastle, Z. (2022). Use of Data Mule Unmanned Aircraft System to Remotely Download Ground Based Sensor Data on Military Lands. ESTCP Guidance Document. RC18-5101.

Paneque, J. L., Martínez-de Dios, J. R., Ollero, A., Hanover, D., Sun, S., Romero, A., & Scaramuzza, D. (2022). Perception-aware perching on powerlines with multirotors. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(2), 3077–3084.

Pentland, A., Fletcher, R., & Hasson, A. (2004). Daknet: Rethinking connectivity in developing nations. *Computer*, 37(1), 78–83.

Rani, C., Modares, H., Sriram, R., Mikulski, D., & Lewis, F. L. (2016). Security of unmanned aerial vehicle systems against cyber-physical attacks. *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 13(3), 331–342.

Shah, R. C., Roy, S., Jain, S., & Brunette, W. (2003). Data mules: Modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 1(2–3), 215–233.

Singh, S. K., & Kumar, P. (2020). A comprehensive survey on trajectory schemes for data collection using mobile elements in WSNs. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11, 291–312.

Teague, S., & Chahl, J. (2023). Strapdown Celestial Attitude Estimation from Long Exposure Images for UAV Navigation. *Drones*, 7(1), 52.

Trotta, A., Di Felice, M., Perilli, L., Scarselli, E. F., & Cinotti, T. S. (2020). BEE-DRONES: Ultra low-power monitoring systems based on unmanned aerial vehicles and wake-up radio ground sensors. *Computer Networks*, 180, 107425.

Tufail, A., Fraser, M., Hammad, A., Hyung, K. K., & Yoo, S. W. (2008). An empirical study to analyze the feasibility of WIFI for VANETs. In *2008 12th international conference on computer supported cooperative work in design* (pp. 553–558). IEEE.

Viswanathan, R., Li, J., & Chuah, M. C. (2005, June). Message ferrying for constrained scenarios. In *Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks* (pp. 487–489). IEEE.

Yağdereli, E., Gemci, C., & Aktaş, A. Z. (2015). A study on cyber-security of autonomous and unmanned vehicles. *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 12(4), 369–381.

Zhao, W., & Ammar, M. H. (2003). Message ferrying: Proactive routing in highly-partitioned wireless ad hoc networks. In *The Ninth IEEE Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems, 2003. FTDCS 2003. Proceedings.* (pp. 308–314). IEEE.

Zheng, L., & Hamaza, S. (2024). ALBERO: Agile Landing on Branches for Environmental Robotics Operations. *IEEE Robotics and Automation Letters*.

